TRAITEMENTS DE CONTRÔLE DES POPULATIONS DE TORDEUSE DES BOURGEONS DE L'ÉPINETTE ET LEUR RESPECT DES PRINCIPES DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Par
Sara Marmen

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

Sous la direction de Monsieur Marc J. Olivier

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Janvier 2014

SOMMAIRE

Mots clés : tordeuse des bourgeons de l'épinette, insecticide, *Bacillus thuringiensis*, régulateur de croissance, phéromone, développement durable

Une nouvelle épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clemens)) démarre au Bas-Saint-Laurent. En ce moment, selon le *Code de gestion des pesticides*, seul l'insecticide à base de *Bacillus thuringiensis* est permis pour le contrôle de cet insecte ravageur sur les territoires forestiers publiques. D'autres options de lutte sont présentement à l'étude pour mener un combat plus adapté à l'écologie de l'espèce. L'objectif du présent essai est de déterminer si ces options de lutte respectent les principes du développement durable. Les produits à l'étude sont un régulateur de croissance, le Mimic^{TM} 240LV et une phéromone synthétique, le Disrupt Bio-Flake SBW. Dans ce contexte, une analyse multicritère a été réalisée afin de départager laquelle des trois options de lutte antiparasitaire est la plus respectueuse des principes du développement durable selon l'environnement, l'économie et le social. Dans un premier temps, une mise en contexte sur le début de la situation épidémique au Bas-Saint-Laurent est présentée, en plus d'une description du cycle vital de l'insecte. Dans un deuxième temps, les trois produits insecticides à l'étude sont présentés et décrits selon leur composition et leur mode d'action. Dans un troisième temps, les effets et conséquences des produits sont décrits en fonction de chacune des sphères du développement durable. Dans un quatrième temps, une comparaison des produits à l'aide d'une grille d'analyse composée de critères spécifiques à chacune des dimensions permet d'évaluer la performance de chacun d'eux. Finalement, des recommandations ont été émises en fonction des résultats de l'analyse. L'analyse multicritère a révélé que les produits à l'étude ont un respect du développement durable semblable. En fait, ce qui a principalement partagé les résultats est l'efficacité à obtenir un effet dès les premières saisons d'application. L'espoir entrevu avec une future utilisation du Mimic^{TM} 240LV et du Disrupt Bio-Flake SBW est leur capacité à confronter les états épidémiques sévères de tordeuse des bourgeons de l'épinette. C'est pourquoi il a été recommandé la révision de la loi québécoise sur les pesticides afin de pouvoir utiliser ces produits comme moyen de lutte plus officiel. De plus, il est recommandé d'informer la population résidente dans les régions où des épandages de produits pesticides sont prévus afin de créer un lien de confiance et de limiter la désinformation. Enfin, il est encouragé de réaliser ou de terminer les tests en cours sur ces nouveaux produits antiparasitaires afin de bien contrôler l'action et les conséquences de ceux-ci.

REMERCIEMENTS

Ma participation à un projet de recherche sur la tordeuse des bourgeons de l'épinette à l'été 2011 a été l'élément déclencheur de mon intérêt envers ce sujet. Je voudrais remercier mon employeur à ce moment, M. Richard Trudel, pour m'avoir aidée à cheminer vers une idée de projet, en plus de m'avoir offert tout le support nécessaire lors de cette réflexion.

Par l'entremise de M. Trudel, j'ai pu participer à une saison de terrain supplémentaire à l'été 2013 sur le même projet. Merci à Mme. Ariane Béchard et M. Jacques Régnière pour cet été fort en apprentissage, et ce, sur tous les plans. Merci d'avoir toujours répondu à mes questionnements avec une extrême gentillesse et de m'avoir référé à des professionnels pouvant m'aider dans mes démarches. Votre dévouement m'a apporté la confiance et la motivation à produire cet essai.

Merci à M. Marc J. Olivier, mon directeur d'essai, pour ses commentaires constructifs et sa présence tout au long du processus d'écriture.

Merci à Aurélie Lagueux-Beloin qui, tout au long de l'automne 2013, m'a permis de discuter avec elle de ce projet. Merci d'avoir rendu le travail si agréable au Centre de foresterie des Laurentides et d'avoir, de façon extraordinaire, rempli mes soirées « congé d'essai ».

Un merci tout spécial à ma sœur, Catherine, pour le temps et les efforts accordés à la relecture de mes textes en fin de parcours.

Je ne pourrais passer sous silence le support de mes amis et de ma famille tout au long de mes études universitaires. Merci de m'avoir encouragée et surtout, de m'avoir fait décrocher des études pour de cours moments! Une part de chacun d'entre vous se retrouve dans cet accomplissement.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

1 MISE EN CONTEXTE 4

1.1 Description de la situation épidémique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec et du cycle vital de l'insecte 4

1.2 Description de la situation de l'épidémie en cours au Bas-Saint-Laurent 5

1.3 Description du territoire d'étude 7

1.4 Définition du contexte de développement durable applicable à la problématique traitée 8

2 MÉTHODE DE CONTRÔLE ACTUELLE ET EN ESSAI POUR LA TORDEUSE DES BOURGEONS DE L'ÉPINETTE 11

2.1 Produit et méthode utilisés présentement comme moyen de lutte antiparasitaire au Québec : Le *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* 11

2.2 Description des produits à l'étude 12

2.2.1 Le Mimic™ 240LV 12

2.2.2 Le Disrupt Bio-Flake SBW 13

2.3 Description de la méthode d'étude utilisée 14

2.4 Conséquences à prévoir par l'utilisation de ces produits 15

2.4.1 Sur l'environnement 15

2.4.2 Sur la faune 17

2.4.3 Sur la santé humaine 19

3 OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE DU CHOIX DE L'OUTIL D'ANALYSE 22

3.1 Objectif de l'analyse 22

3.2 Justification du choix de l'analyse multicritère comme outil d'aide à la décision 22

4 LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DU DÉVELOPPEMENT DURABLE 24

4.1 Description des aspects environnementaux touchés 24

4.2 Choix des critères environnementaux du développement durable 30
5 LES ASPECTS ÉCONOMIQUES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE 33
5.1 Description des aspects économiques touchés 33
5.2 Choix des critères économiques du développement durable 36
6 LES ASPECTS SOCIAUX DU DÉVELOPPEMENT DURABLE 39
6.1 Description des aspects sociaux touchés 39
6.2 Choix des critères sociaux du développement durable 42
7 ANALYSE MULTICRITÈRE SELON LES PRINCIPES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE 45
7.1 Méthodologie de l'analyse multicritère de l'étude 45
7.2 Analyse des résultats 46
7.2.1 Analyse environnementale 47
7.2.2 Analyse économique 52
7.2.3 Analyse sociale 56
7.3 Conclusion de l'analyse multicritère 59
8 RECOMMANDATIONS.....63
CONCLUSION 65
RÉFÉRENCES 68

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Défoliation des forêts par la tordeuse des bourgeons de l'épinette pour l'année 2012 pour la province de Québec 6

Figure 1.2 Villages où sont situés les sites d'échantillonnage dans le cadre de l'étude menée sur la tordeuse des bourgeons de l'épinette par la Société de protection des forêts contre les insectes et les maladies (SOPFIM) et Ressources Naturelles Canada (RNCAN), au Bas-Saint-Laurent, à l'été 2013 8

Figure 4.1 Taux de survie des larves de stade 4 de tordeuse des bourgeons de l'épinette lors d'application simple ou double de Mimic^{TM} 240LV et de *Bacillus thuringiensis* au Bas-Saint-Laurent pour les années 2012 et 2013. 30

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 4.1 Critères d'évaluation concernant la sphère du développement durable de l'environnement 31

Tableau 5.1 Critères d'évaluation concernant la sphère du développement durable de l'économie 37

Tableau 6.1 Critères d'évaluation de la sphère sociale du développement durable 43

Tableau 7.1 Définition de l'échelle de performance de la grille d'analyse multicritère 46

Tableau 7.2 Résultats d'évaluation concernant la sphère du développement durable de l'environnement 47

Tableau 7.3 Résultats d'évaluation concernant la sphère du développement durable de l'économie 52

Tableau 7.4 Résultats d'évaluation concernant la sphère du développement durable social 56

Tableau 7.5 Pointage et moyennes pondérées obtenues pour chaque critère d'analyse selon les trois sphères du développement durable (environnement, économie, sociale) (Mimic^{TM} 240LV, Disrupt Bio-Flake, *Bacillus thuringiensis*) 59

LISTE DES ACRONYMES ET DES SIGLES

AAC	Agriculture et Agroalimentaire Canada
ARLA	Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire
Btk	*Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki*
CRAAQ	Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
DD	Développement durable
IRSEA	Institut de Recherche en sémiochimie et éthologie appliquée
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MRN	Ministère des Ressources Naturelles
OFDT	Office fédéral du développement territorial
RNCAN	Ressources naturelles Canada
SOPFIM	Société de protection des forêts contre les insectes et les maladies
TBE	Tordeuse des bourgeons de l'épinette
WRI	*World Resources Institute*

LISTE DES SYMBOLES

BIU	milliard d'unités internationales
DAR	dose aigüe de référence
DJA	dose journalière admissible
g	gramme
g/ha	gramme par hectare
ha	hectare
km^2	kilomètre carré
Koc	constante d'absorption sur le carbone organique
LD_{50}	dose létale
ml/g	millilitre par gramme
mg/kg	milligramme par kilogramme
mg/L	milligramme par litre
mm	millimètre
Mm^3	millions de mètres cubes
ppm	partie par million

LISTE DES SYMBOLES CHIMIQUES

Fe^{2+}	fer ferreux
Fe^{3+}	fer ferrique

LEXIQUE

Abiotique	Conditions environnementales qui concernent la matière inerte (DictionnairEnvironnement, 2010d)
Aérobie	Réaction nécessitant la présence d'oxygène (DictionnairEnvironnement, 2010a)
Agoniste	Se dit d'une substance capable de se fixer sur les mêmes récepteurs cellulaires qu'une substance de référence. Cette substance peut produire, totalement ou en partie, les mêmes effets que la substance de référence (Dicionnaire de français Larousse, s.d.b)
Bactérie entomopathogène	Se dit d'une bactérie utilisée dans la lutte contre les insectes (Reverso, s.d.a)
Bioaccumulation	Décrit la capacité des organismes à absorber et accumuler des substances chimiques dans leur organisme (DictionnairEnvironnement, 2010b)
Champignon entomopathogène	Se dit d'un champignon utilisé dans la lutte contre les insectes (Reverso, s.d.a)
Chrysalide	Étape de la nymphe chez les lépidoptères, se situant entre les stades de chenille et de papillon (Dictionnaire de français Larousse, s.d.a)
Complexation	Réaction chimique provoquant la formation d'un complexe chimique (Reverso, s.d.b)
Cuticule	Exosquelette chez les arthropodes (Campbell et autres, 2004)
Demi-vie	Désigne le temps nécessaire pour que l'activité d'une substance chimique soit diminuée de moitié (DictionnairEnvironnement, 2010c)
Dose létale	Dose qui entraîne 50 % de mortalité des animaux de laboratoire traités (DictionnairEnvironnement, 2010d)
Hibernaculum	Abri servant à un insecte à passer l'hiver (Reverso, s.d.c)
Hydrolyse	Réaction amenant une substance chimique à être détruite par l'eau (Dictionnaire de français Larousse, s.d.c)
Lessivage	Phénomène par lequel des substances fixées à des particules sont entraînées par l'eau (DictionnairEnvironnement, 2010f)

Mélanisation	Action de coloration de la cuticule des insectes (Reverso, s.d.d)
Persistance	Caractéristique d'une substance à demeurer présente dans l'environnement (DictionnairEnvironnement, 2010g)
Phéromone	Substance émise par des insectes provoquant chez le sexe opposé de la même espèce des réactions comportementales précises (Dictionnaire de français Larousse, s.d.d)
Photolyse	Réaction amenant à la rupture d'une liaison chimique à l'aide de l'énergie d'un photon (DictionnairEnvironnement, 2010h)
Phytotoxicité	Se rapporte à la toxicité envers les plantes (DictionnairEnvironnement, 2010i)
Univoltine	Espèces d'insecte ne produisant qu'une génération par année (Dictionnaire de français Larousse, s.d.e)
β— oxydation	Processus oxydatif par lequel des acides gras sont dégradés en acétyl-coenzyme A (Dictionnaire Santé, 2011)

INTRODUCTION

Le Québec est une province garnie de vastes territoires forestiers dont la réputation n'est plus à faire. Bien que ces étendues vertes proposent un paysage unique en plus d'être une source d'apport économique important, ces forêts de l'est du Canada voient leur structure et leur succession végétale changer non seulement par l'activité forestière, mais aussi par des ravageurs forestiers. Ces insectes, parfois venus d'ailleurs, parfois endémiques, peuvent atteindre la santé des forêts à plusieurs niveaux, jusqu'à la mort des végétaux infestés. Un des ravageurs célèbre au Québec et en Amérique du Nord est la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) (*Choristoneura fumiferana* (Clemens)). Ce ravageur indigène atteint un niveau épidémique environ tous les 30ans. La dernière épidémie ayant eu lieu de 1967 à 1992 a créé une crise forestière importante en détruisant entre 139 et 238 Mm^3 de matières ligneuses, mais dont une forte partie a pu être récupérée. L'industrie forestière étant très importante comme activité économique pour la province, de telles pertes de volume de bois peuvent avoir de grandes conséquences économiques et sociales. Déjà que le marché du bois n'a pas la réputation d'être très stable en fonction de l'offre et de la demande, lorsqu'une rareté de la ressource se fait sentir, plusieurs acteurs directs ou indirects en subissent les soubresauts. Bien qu'un traitement insecticide, le *Bacillus thuringiensis*, soit utilisé pour contrer ce problème, ce traitement possède des limites d'intervention devant la gravité de l'épidémie. Avec les avancées technologiques, différentes méthodes synthétiques de contrôle des ravageurs sont testées par les scientifiques pour désamorcer ou bien traiter efficacement un épisode épidémique TBE.

Ainsi, l'objectif principal de la présente étude est d'analyser le respect des principes du développement durable (DD) par deux nouveaux moyens de lutte contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette et d'en ressortir des recommandations. Il s'agit d'un régulateur de croissance (Mimic^{TM} 240LV) et d'une phéromone synthétique (Disrupt Bio-Flake SBW). Ces technologies seront comparées au seul produit insecticide utilisé présentement, le *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* (Btk). Les trois produits antiparasitaires seront évalués en fonction de critères élaborés pour chacune des sphères du développement durable dans une analyse multicritère : l'environnement, l'économie et le social. Afin d'y parvenir, la démarche d'analyse contient comme étape deux objectifs spécifiques.

En premier lieu, une description précise de la composition, du fonctionnement et des conséquences à prévoir par l'utilisation du Mimic^{TM} 240LV, du Disrupt Bio-Flake et du *Bacillus thuringiensis* sera établie. En deuxième lieu, il y aura analyse à l'aide d'un outil d'aide à la décision des conséquences de chacun des produits à l'étude sur les sphères du développement durable : l'environnement, l'économie et le social.

Le présent document comporte huit chapitres décrivant l'objectif principal et les objectifs spécifiques. Le premier chapitre met de l'avant une mise en contexte de la situation épidémique en cours au Bas-Saint-Laurent. De plus, l'écologie de l'insecte sera présentée en lien avec les définitions appliquées du contexte de développement durable.

Le chapitre deux présentera les composés à l'étude. Ils seront aussi analysés de façon à entrevoir les conséquences de leur utilisation.

L'objectif et le choix de la méthodologie concernant le choix de l'outil d'analyse en lien avec le développement durable, l'analyse multicritère, seront exposés au chapitre 3.

Le quatrième chapitre regroupera la description des aspects environnementaux touchés par la problématique traitée. Par la suite, le choix des critères d'évaluation et leur justification, le tout en lien avec cette sphère du développement durable, sera démontré en fin de chapitre. La même structure sera appliquée pour les chapitres 5 et 6 qui porteront respectivement sur la sphère économique et sociale du développement durable.

Le septième chapitre exposera l'analyse multicritère complète pour toutes les sphères du développement durable. Ce chapitre sera divisé en deux parties, soit en premier lieu par l'analyse des résultats et en deuxième lieu par la conclusion de l'analyse.

Enfin, le chapitre 8 viendra apporter des recommandations en se basant sur les résultats de l'analyse. Le but visé sera de suggérer des actions qui pourront aider au contrôle antiparasitaire dans les situations épidémiques de tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Parmi les sources de renseignements utilisées dans le cadre de ce rapport, une forte crédibilité sera accordée aux articles scientifiques et à la documentation gouvernementale. La pertinence de certaines sources tiendra compte de leur citation dans des documents scientifiques ou si elle

exprime une réalité vécue rapportée par un média valable. Les communications entretenues avec des chercheurs spécialisés dans le domaine seront considérées comme des sources sûres et valides. En fonction de l'information recherchée, certaines sources historiques remonteront jusqu'à 30ans. La majorité du temps, elles dateront de moins de cinq ans.

1 MISE EN CONTEXTE

1.1 Description de la situation épidémique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec et du cycle vital de l'insecte

La tordeuse des bourgeons de l'épinette est un insecte s'attaquant essentiellement aux essences résineuses, mais tout en étant généraliste. Les espèces pouvant être la cible de cet insecte sont l'épinette blanche, rouge et noire (*Picea glauca Picea rubens, Piecea mariana*) (Jardon et autres, 2003). Cependant, l'espèce de prédilection de cet insecte est le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill). Les ravages engendrés par la tordeuse sont entre autres répertoriés dans la sous-zone de la forêt boréale continue, dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc, qui représente près de 139 000 km^2 au Québec (MRN, 2013). Ces épidémies sont considérées comme des perturbations majeures en forêt boréale, au même titre que les feux, et permettent la formation de mosaïque forestière en éliminant en partie la strate arborescente constituée de sapins matures. Cela peut prendre plusieurs décennies avant qu'une forêt ayant subi des dommages par la tordeuse des bourgeons de l'épinette ne retrouve ses caractéristiques de forêt mature de nouveau sensible à la situation précédemment mentionnée (Jardon et autres, 2003). Les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette suivent un cycle d'environ 30 ans. Celles-ci surviennent lorsqu'un amalgame de facteurs est réuni et favorise alors l'explosion soudaine des populations de TBE (Fournier, 2009).

La tordeuse des bourgeons de l'épinette ne produit qu'une génération de descendants par année, elle est donc qualifiée d'espèce univoltine. Les aiguilles des conifères servent de support pour les œufs déposés pendant la période de ponte, débutant vers la fin du mois de juillet. Les œufs éclosent au mois d'août et les minuscules chenilles vont se trouver un endroit leur permettant d'être à l'abri des intempéries hivernales. Elles vont alors s'y tisser un hibernaculum. Ce n'est qu'à la fin avril, avant que les arbres ne débourrent, que les chenilles, maintenant à un deuxième stade larvaire, vont émerger afin d'aller se nourrir des bourgeons de fleurs staminées ou bien des aiguilles des années précédentes en attendant l'ouverture des bourgeons de l'année. Au moment de l'ouverture des bourgeons, les chenilles vont s'infiltrer à l'intérieur même des bourgeons afin de commencer à se nourrir du feuillage de la présente année. Puis au mois de juillet, les chenilles vont cesser de se nourrir afin de former leur chrysalide. Ce n'est qu'après quelques jours suivants

la formation de la chrysalide que les papillons adultes émergeront et débuteront la période d'accouplement (Fournier, 2009).

L'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette est recensée dans plusieurs régions de la province. Il est à noter que, selon le ministère des Ressources Naturelles (MRN), le total des superficies atteintes a plus que doublé lors de l'inventaire de 2010 (MRN, 2011). Les régions administratives les plus touchées sont celles situées sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, en plein dans la forêt boréale : la Côte-Nord, le Saguenay-Lac-Saint-Jean et l'Abitibi-Témiscamingue. La faible présence de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Bas-Saint-Laurent ne permet pas encore d'observer une défoliation (MRN, 2011).

1.2 Description de la situation de l'épidémie en cours au Bas-Saint-Laurent

L'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette a atteint le Bas-Saint-Laurent, dans la région de Rimouski, en 2010 (Figure 1.1) (RNCAN, s.d.). L'invasion de cet insecte s'est transportée de la Côte-Nord vers la rive sud par la migration des papillons de tordeuse au-dessus du fleuve Saint-Laurent. Étant donné la forte incidence de l'insecte dans la région de Baie-Comeau, cela peut expliquer pourquoi l'épidémie en cours a lieu précisément dans la région de Rimouski, qui fait face à cette région de la Côte-Nord. Il est possible de corroborer cette hypothèse par l'absence de tordeuse des bourgeons de l'épinette dans la région du Témiscouata puisque la TBE n'est pas recensée dans les régions face à cette région administrative sur la rive nord du fleuve (Régnière, 2013[1]). La nature cyclique de ces perturbations laisse supposer qu'une augmentation notable des populations de cet insecte dans la région à l'étude est à prévoir. Même si des diminutions des populations de TBE ont été répertoriées dans différentes régions du Canada au cours des dernières années, la situation épidémique gagne du terrain dans l'est du pays, soit au Québec et en Ontario. Les spécialistes supportent donc l'hypothèse que cette recrudescence annonce le début d'une nouvelle infestation pour ces provinces (RNCAN, s.d.).

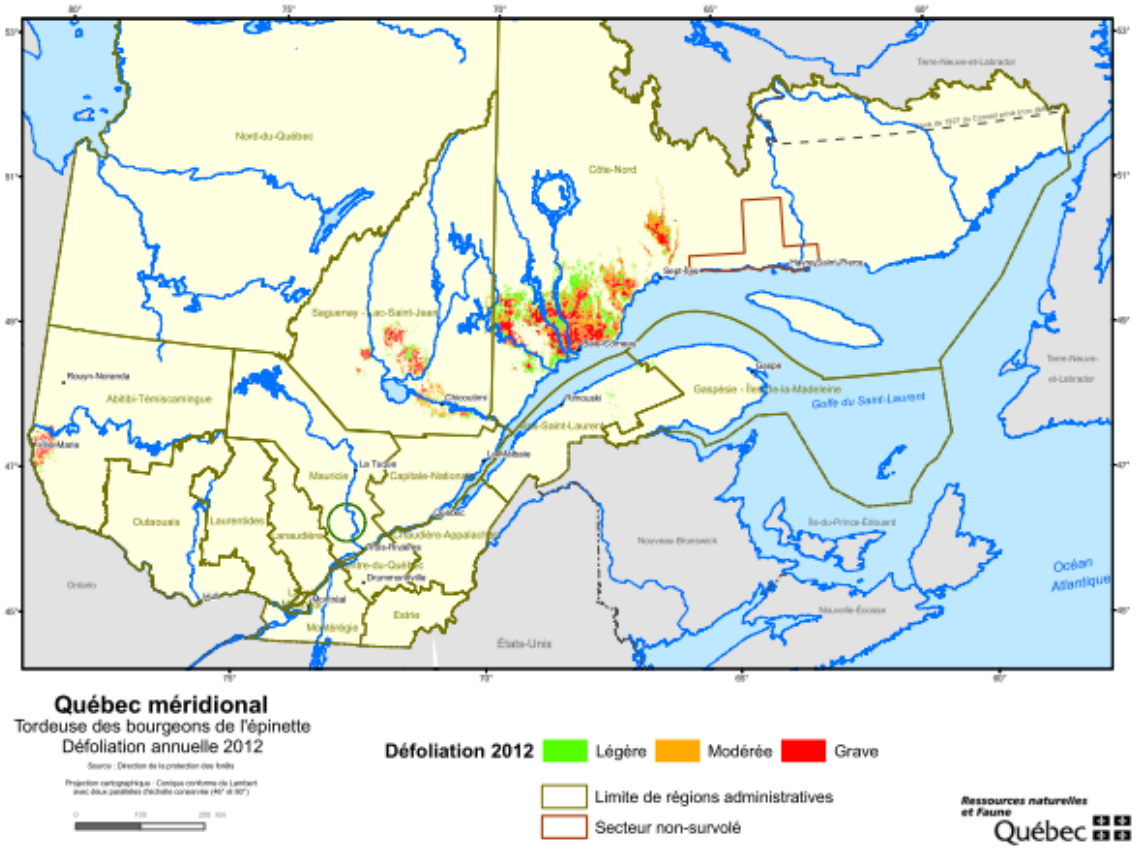

Figure 1.1. Défoliation des forêts par la tordeuse des bourgeons de l'épinette pour l'année 2012 pour la province de Québec (Tiré de : Aires infestées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec en 2012, Direction de la protection des forêts, Québec, septembre 2012)

Plusieurs facteurs permettent l'émergence d'épidémies de TBE de plus forte envergure. Le facteur limitant est la présence de vastes superficies de forêts hôtes, soit de sapin baumier. De plus, les périodes épidémiques vont aussi correspondre aux cycles naturels des ennemis de cet insecte, comme des prédateurs (oiseaux), des parasitoïdes et des agents pathogènes (RNCAN, s.d.). Le fort taux de parasitisme dans la région à l'étude permet de garder les populations de TBE à de faibles densités (Pureswaran et autres, 2013). Les conditions météorologiques peuvent aussi favoriser jusqu'à un certain point l'avancement des épidémies, mais dans un rôle peu connu pour le moment (RNCAN, s.d.).

L'épidémie naissante au Bas-Saint-Laurent devient un excellent lieu d'étude afin de tester de nouvelles interventions hâtives permettant de ralentir le déroulement de l'épidémie et d'ainsi en minimiser les impacts (Pureswaran et autres, 2013).

1.3 Description du territoire d'étude

Une nouvelle épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette est aux portes du Bas-Saint-Laurent. Afin d'en évaluer l'état d'avancement depuis 2011, un projet d'étude a lieu dans cette région administrative. La SOPFIM et RNCAN collaborent afin de vérifier le potentiel de prévention de l'utilisation de nouveaux produits antiparasitaires, le Mimic^{TM} 240LV et le Disrupt Bio-Flake SBW. Afin d'y parvenir, différentes parcelles d'études ont été choisies dans la région afin d'y effectuer des manipulations et des arrosages expérimentaux (Figure 1.2). Ces parcelles sont principalement situées dans les municipalités régionales de comté de Rimouski-Neigette, de la Mitis, de Matane et de la Matapédia.

La forêt privée ne représente que 50 % du territoire forestier dans cette région. La portion publique est reconnue pour avoir un potentiel industriel important. Ce sont majoritairement des entreprises familiales qui transforment la majeure partie du bois récolté en forêt. Cependant, la région dispose davantage d'entreprises de transformation du bois que ce que la forêt peut fournir en termes de volume de bois. Il est à noter que la forêt bas-laurentienne est une des mieux aménagées de la province de Québec par ses aménagements forestiers constants des trente dernières années. Elle pourrait alors soutenir les activités forestières des années à venir (MRN, 2013).

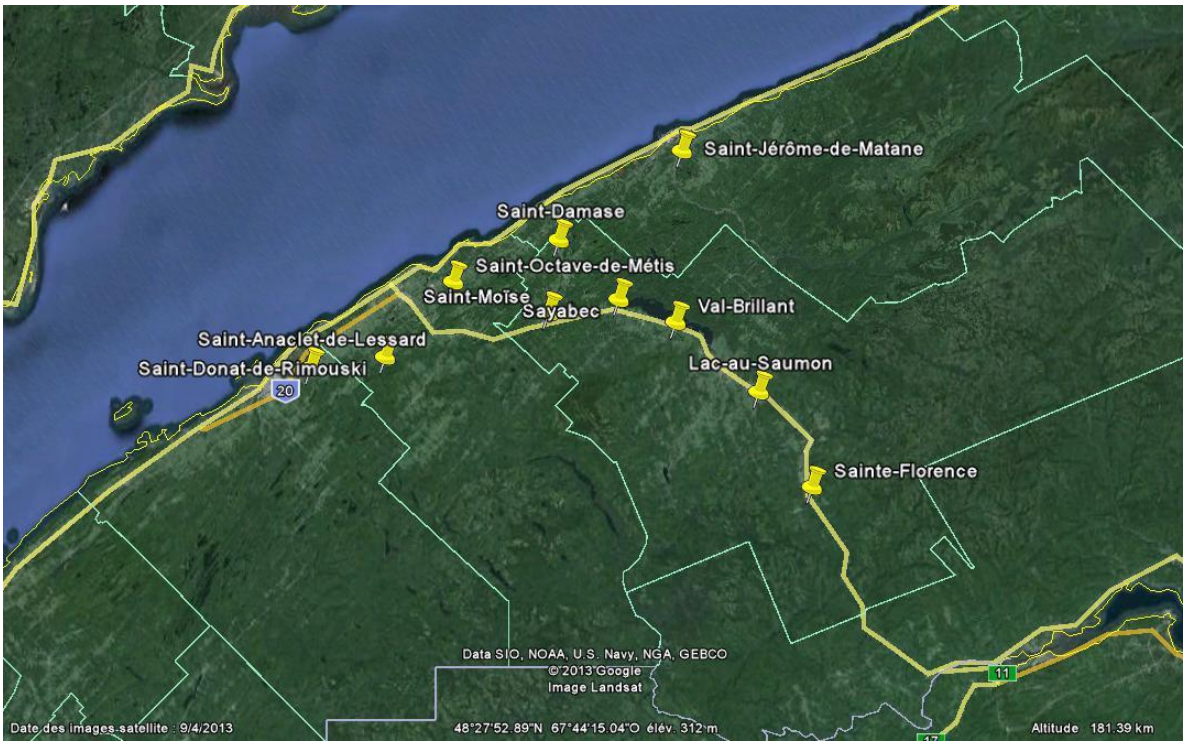

Figure 1.2. Villages où sont situés les sites d'échantillonnage dans le cadre de l'étude menée sur la tordeuse des bourgeons de l'épinette par la Société de protection des forêts contre les insectes et les maladies (SOPFIM) et Ressources Naturelles Canada (RNCAN), au Bas-Saint-Laurent, à l'été 2013

1.4 Définition du contexte de développement durable applicable à la problématique traitée

La province de Québec véhicule une image de vastes territoires forestiers où prennent place différents types de forêts tout aussi uniques. Ces forêts ont des rôles de premier plan pour les aspects environnemental, économique et social. Elles peuvent donc avoir des impacts directs sur les communautés qui lui sont reliées de près ou de loin. Les forêts québécoises composent 20 % des forêts canadiennes et la zone de végétation dense est équivalente à 760 000 km^2. Il est à noter que le territoire forestier exploitable, c'est-à-dire les forêts commerciales, représente 70 % de cette superficie (MRN, 2010).

Ces forêts sont un moteur économique d'importance dans certaines régions de la province. Plusieurs communautés vivent des emplois et des revenus de diverses activités connexes telles que l'exploitation forestière, les produits du bois et la fabrication du papier. Ces domaines constituent des activités économiques majeures pour les régions et l'économie québécoise. Ces

industries génèrent près de 80 000 emplois directs en foresterie et en transformation du bois. Une statistique montre qu'un emploi sur six relié au domaine de la foresterie engendre 1,6 emploi indirect dans l'économie québécoise. Près de 250 municipalités du Québec vivent de l'activité forestière (MRN, 2010).

Les forêts québécoises sont des écosystèmes constituant des habitats de prédilection pour la faune. Près de 200 espèces d'oiseaux et 60 de mammifères sont distribués à travers les différents types de forêts. Les écosystèmes forestiers sont parsemés de plans d'eau et de rivières abritant elles aussi une faune aquatique riche d'une centaine d'espèces de poissons (MRN, 2010).

La forêt boréale est un écosystème singulier, où sévit particulièrement la tordeuse des bourgeons de l'épinette. C'est dans ce type de forêt, située dans le nord de la province, que l'on retrouve les plus grandes étendues forestières. Celle-ci a une superficie de 1 068 400 km^2 dont 30 % sont destinées à la production forestière. De plus, cet écosystème comporte des superficies de terres humides permettant de filtrer des millions de litres d'eau. Des efforts de conservation de l'environnement sont aussi très présents, même à grande échelle. Les pratiques utilisées en ce moment par les exploitants forestiers dans ce type de forêts, situé sur le territoire public, sont axées sur la remise en production. La forêt est aménagée en protégeant au maximum la régénération déjà établie dans le sous-bois. Le reboisement est une option utilisée lorsque la régénération est absente. La récolte forestière annuelle équivaut à moins de 1 % de la forêt publique en aménagement sur tout le territoire québécois (MRN, 2010).

Il est donc possible d'affirmer, selon ce qui a été exposé précédemment, que les forêts québécoises ont une importance marquante pour la société sous plusieurs aspects. Notamment, les forêts sont gérées présentement de façon plus saine selon des méthodes pouvant rejoindre les principes du développement durable, afin d'assurer une pérennité de cette ressource. C'est dans cet axe que la présente analyse sera dirigée, c'est-à-dire valider qu'une innovation dans la lutte aux insectes et aux maladies puisse apporter des changements et utiliser des méthodes respectant l'esprit du DD.

Depuis l'introduction du concept de développement durable, popularisé en 1987 au moment de la publication du rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement,

notre avenir à tous, connu aussi sous le nom de rapport Brundtland (Lafrance, 2006), des pratiques dans plusieurs domaines d'exploitations tendent à respecter des critères variables visant la conservation d'une santé environnementale, économique et sociale. L'exploitation forestière québécoise ne fait pas exception à la règle. Comme il a été apporté précédemment, l'industrie forestière québécoise utilise déjà des actions, selon des moyens législatifs ou de bonnes méthodes de travail, qui tendent vers un aménagement durable des forêts et donc, vers le développement durable. Cependant, des cycles d'infestation d'insectes entrent dans les dommages pouvant affecter les trois sphères du développement durable. Les projets de recherches en cours sur la viabilité d'une méthode hâtive de lutte contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette pourraient possiblement venir atténuer ces impacts. Il est tout de même important d'analyser cette innovation afin de confirmer que cette technique rejoint elle aussi les principes DD qui dirigent en partie l'exploitation forestière actuelle. C'est pourquoi, pour chaque sphère du développement durable, les méthodes utilisant le Mimic^{TM} 240LV, le Disrupt Bio-Flake SBW et le *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* seront analysée selon des critères s'appliquant aux trois aspects du DD. Pour ce faire, la définition appliquée du développement durable aux fins de l'analyse est la suivante :

> « Le développement durable des terres forestières et de leur valeur économique et écologique multiple consiste à maintenir, indéfiniment, sans détérioration inacceptable, la capacité de production et de renouvellement, ainsi que la diversité écologique et variétale des écosystèmes forestiers. » (Maini, s,d., p.1).

2 MÉTHODE DE CONTRÔLE ACTUELLE ET EN ESSAI POUR LA TORDEUSE DES BOURGEONS DE L'ÉPINETTE

2.1 Produit et méthode utilisés présentement comme moyen de lutte antiparasitaire au Québec : Le *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki*

La lutte antiparasitaire au niveau des territoires forestiers a une histoire plutôt récente dans la province de Québec. Dernièrement, soit en 2001, la province a fait une avancée en matière de contrôle antiparasitaire en interdisant l'utilisation de pesticides chimiques en milieu forestier. Après ce tournant, plusieurs produits biologiques ont fait leur apparition sur le marché afin de pouvoir tout de même protéger les forêts contre les organismes indésirables, dont la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Parmi tous les groupes de produits biologiques, soit les bactéries entomopathogènes, les phéromones, les virus et les champignons entomopathogènes, une seule à ce moment avait réussi à prouver son efficacité : les bactéries entomopathogènes. La bactérie *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki*, communément appelé le Btk, forme donc l'ensemble des produits pouvant être utilisés contre les ravageurs forestiers au Québec. Cette bactérie est naturellement présente dans les sols, mais aussi dans l'eau ou la végétation (SOPFIM, 2011).

Ce produit est appliqué sur les territoires forestiers la plupart du temps par voie aérienne à l'aide d'aéronefs spécialisés. Ce qui rend cette bactérie entomopathogène est son aptitude à générer une protéine dite cristalline, qui devient toxique lorsqu'elle se retrouve en milieu basique. La tordeuse des bourgeons de l'épinette fait partie de l'ordre des lépidoptères, ce qui est aussi le cas des principaux ravageurs forestiers. Cet ordre d'insecte possède un système digestif alcalin, donc vulnérable à la protéine du Btk. Lorsque la larve de ce lépidoptère ingère la bactérie, déposée préalablement sur le feuillage dont se nourrit la larve, la toxine de la protéine cristalline détruira les parois de l'intestin de l'insecte. Celui-ci arrêtera donc de se nourrir et sa mort pourra être constatée de deux à cinq jours plus tard (SOPFIM, 2011).

Le Btk est utilisé au Québec depuis les années 80, mais 50 ans auparavant, ce produit était déjà utilisé dans plusieurs domaines. L'agriculture conventionnelle et biologique, l'horticulture, et la santé publique en sont quelques exemples. Il existe plusieurs variétés de la bactérie qui sont aussi homologuées pour lutter contre d'autres ordres d'insectes. C'est donc grâce à sa versatilité et sa sécurité que le Btk est l'insecticide biologique tout indiquer pour faire face aux dommages causés

par les insectes sur les territoires forestiers (SOPFIM, 2011). Cette bactérie ne peut survivre dans les organismes à sang chaud, ce qui la rend sans danger pour la santé humaine. Même si la bactérie est absorbée par voie alimentaire, celle-ci traverse le tractus intestinal sans causer le moindre effet toxique ou inconfort (Santé Canada, 2009).

2.2 Description des produits à l'étude

2.2.1 Le Mimic™ 240LV

Le Mimic™ 240LV est un insecticide forestier ayant pour action de réguler la croissance des organismes visés. Cet insecticide a été créé pour contrôler non seulement la tordeuse des bourgeons de l'épinette, mais aussi la tordeuse du pin gris (*Choristoneura pinus* Freeman), l'arpenteuse de la pruche (*Lambdina fiscellaria* Guenée) et la chenille à houppes blanches (*Orygia leucostigma*). (Dow AgroSciences. 2008). Il est épandu dans le but de stopper les larves de ces insectes de consommer le feuillage des arbres (Dow AgroSciences, s.d.). Ce produit s'avère à être spécifique aux lépidoptères (Dallaire, 2003). Les ingrédients actifs du Mimic™ 240LV sont les suivants :

- Tébufénozide
- Glycérine
- 1,2-benzisothiazoline-3-one (agent de conservation, 0,02 %))

Le tébufénozide est par le fait même la substance ayant un effet sur la croissance de ces insectes. La présence de cette substance dans l'organisme de l'insecte agit directement sur le système hormonal en induisant une mue prématurée, incomplète et létale chez les larves de lépidoptères (Dallaire, 2003). Elle simule donc l'action de l'ecdysone, l'hormone de la mue chez les invertébrés arthropodes qui a pour rôle principal de contrôler la croissance et le développement chez l'insecte. À la suite de l'apparition de cette substance dans l'organisme de l'insecte, les larves vont cesser de se nourrir dans les heures qui suivent. Par la suite, elles entreprendront une mue qui leur sera fatale. La mortalité de l'insecte survient en moyenne entre trois et sept jours, le tout selon la physiologie des espèces et des conditions environnementales locales en vigueur à ce moment (Dow AgroSciences, 2008).

Des études ont démontré que les interversions morphologiques et structurales engendrées par le tébufénozide sont les mêmes que celles en présence de l'hormone naturelle, l'ecdysone. Par contre, l'effet létal de cette molécule réside dans le fait qu'elle encombre de façon continue les récepteurs spécifiques à l'ecdysone. À ce moment, aucune chute de concentration de l'agoniste n'est perçue par l'organisme ce qui ne permet pas l'expression des gènes permettant la mélanisation et la sclérotisation de la cuticule de l'insecte (Dallaire, 2003).

Le mode d'emploi de cet insecticide lorsque l'on l'applique à la problématique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette se fait par voie aérienne. Un épandage aérien est requis pour atteindre les larves qui se retrouvent dans le feuillage des arbres et non au sol. Il est possible dans certains cas qu'une seconde application soit nécessaire afin d'assurer une couverture suffisante (Dow AgroSciences, 2008). L'application doit être réalisée entre le troisième et le sixième stade larvaire de l'espèce, soit à la sortie des bourgeons du sapin baumier ou bien de l'épinette. Ceci correspond donc de la fin mai jusqu'au début juillet. Ce type de traitement requiert un suivi du nombre d'individus recensés dans la superficie traitée pour déterminer si d'autres arrosages seront nécessaires dans les années subséquentes (Régnière, 2013).

2.2.2 Le Disrupt Bio-Flake SBW

Le Disrupt Bio-Flake SBW est un produit dont la molécule active est comparable à la phéromone naturelle que la tordeuse des bourgeons de l'épinette femelle émet au moment de la saison de reproduction. Cette phéromone est un signal qui permet d'indiquer aux mâles où se trouvent les femelles qui sont à ce moment prêtes pour l'accouplement. Ce produit a pour but de créer une confusion sexuelle en créant un « nuage d'odeur de phéromone synthétique femelle » sur toute la parcelle traitée et d'ainsi interférer avec les capacités des mâles à retracer les femelles dans l'environnement sous traitement. Ceci permet de réduire les possibilités d'accouplement, et donc, de diminuer le succès de reproduction des populations de tordeuses (Hercon Environnemental, 2011).

Le Disrupt Bio-Flake SBW est composé de :

- 95/5 E/Z-11 tétradécenal 10,0%

Le produit est sous forme de flocons biodégradables qui peuvent être épandus de façon aérienne ou terrestre. L'application doit être réalisée lors de la période de reproduction de l'insecte, soit aux environs de la mi-juillet. Un épandage aérien est de mise puisque les papillons, lors de la reproduction, se retrouvent en hauteur dans la canopée, entre la mi-couronne et la couronne des arbres. Pour effectuer le suivi de ces opérations et estimer leur efficacité, des projets de recherche ont échantillonné des masses d'œufs sur des branches de sapin baumier avant l'application et 20 jours suivant celle-ci. Les œufs étaient caractérisés selon trois critères soit fertiles, infertiles, parasités ou bien émergés. Aussi, afin de recenser le succès d'accouplement lors de ces opérations, des cagettes comportant à l'intérieur des tordeuses femelles ont été installées de façon uniforme dans les parcelles subissant un traitement (Trudel et autres, 2011). Celles-ci étaient récoltées et remises en place à tous les trois jours pour évaluer la présence de mâles par l'analyse des spermatophores, petite capsule contenant des spermatozoïdes que les mâles injectent dans le corps de la femelle (H. Resh et T. Cardé, 2009). Cette méthode encore expérimentale à ce jour nécessite d'autres études afin de bien cerner les effets bénéfiques que cet outil peut avoir sur la gestion des forêts aux prises avec une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (Trudel et autres, 2011).

2.3 Description de la méthode d'étude utilisée

Cela fait maintenant un peu plus de 10 ans que seul le Btk fait office d'insecticide pour les forêts québécoises rongées par les ravageurs. Depuis, les innovations dans ce domaine n'ont cessé de croître, donnant naissance à des produits visant une efficacité supérieure ou un mode d'action différent. L'étude menée par la SOPFIM et RNCan depuis 2011 teste deux produits, déjà utilisés au Canada et aux États-Unis : le Mimic^{TM} 240LV et le Disrupt Bio-Flake SBW. Il est à noter que selon la règlementation, ces deux insecticides ne sont pas considérés comme étant biologiques (Régnière, 2013)

Au cours de l'été 2013, il a été tenté d'obtenir des résultats afin de quantifier l'efficacité de ces produits sur des populations de tordeuses des bourgeons de l'épinette, au Bas-Saint-Laurent. Des

parcelles contenant des populations allant de très faible à très forte ont été choisies afin d'effectuer des arrosages aériens expérimentaux. Des relevés terrains ont été réalisés avant et après ces arrosages afin d'observer les effets engendrer par l'application de ces insecticides sur les populations de tordeuses.

Cette étude permet de souligner que d'autres méthodes de luttes pourraient devenir envisageables si celles-ci surpassent les résultats obtenus avec le Btk. Ce projet reste donc un point à suivre dans ce domaine qui ne cesse d'évoluer, pour le bien des forêts et de la société.

2.4 Conséquences à prévoir par l'utilisation de ces produits

2.4.1 Sur l'environnement

Comme toutes les nouvelles technologies antiparasitaires, leur impact direct ou bien indirect sur l'environnement dans lequel elles sont utilisées demeure des enjeux importants dont il est primordial de tenir compte. Bien que certaines d'entre elles contiennent des agents organiques ou sont en fait des produits synthétiques de molécules organiques, cela n'est pas pour autant un gage d'inoffensivité. Les propriétés chimiques des substances utilisées informent sur le comportement que les produits, tels de nouveaux insecticides, adoptent une fois qu'ils sont présents dans l'environnement.

L'ingrédient actif du Mimic^{TM} 240LV, le tébufénozide, est un insecticide de la famille chimique diacylhydrazine et du groupe de pesticide 18A. Il est d'une apparence liquide, de couleur blanc cassé (Dow AgroSciences, s.d.a). Son comportement dans l'environnement est décrit selon les notions de persistance et de potentiel de lessivage. Le tébufénozide, en conditions abiotiques, est une substance stable à l'hydrolyse de par sa demi-vie de 1034 jours. De plus, il est relativement résistant à la photolyse dans les sols et dans l'eau, avec une durée de vie respective de 98 et 67 jours. Une transformation lente a aussi été observée dans les sols et dans l'eau, et ce, en condition aérobie. Une demi-vie de 405 jours dans les sols et de 100 jours dans l'eau a été calculée pour ce dernier critère. À la suite de ces résultats, il est possible d'affirmer que le tébufénozide est persistant dans l'environnement. La constante d'absorption sur le carbone organique (Koc) de cette même substance est de 351 ml/g. Cette donnée nous informe sur la mobilité modérée du tébufénozide dans les sols. Cette dernière caractéristique associée à la persistance de cette substance permet d'évaluer à un niveau élevé son potentiel de lessivage. Enfin, selon la constante

de la loi de Henry, le tébufénozide ne serait pas sujet à une évaporation à partir des sols humides ou bien de l'eau (CRAAQ, 2013).

Selon Dow AgroScience (2008), la compagnie à l'origine du Mimic^{TM} 240LV, une demi-vie de 18 à 44 jours est observable au niveau de la persistance du produit à l'intérieur même des arbres ou du feuillage des conifères, les aiguilles.

Lors d'une application de Mimic^{TM} 240LV, des zones tampons autour des divers plans d'eau ou rivières doivent être instaurées puisqu'il a été démontré que ce produit peut être persistant dans l'eau et dans le sol. Il faut alors s'assurer que l'insecticide ne se retrouve pas dans les cours d'eau ou bien qu'il y soit acheminé par le lessivage des sols en ne respectant pas une distance appropriée (Dow AgroSciences, s.d.a). Ces zones tampons sont basées sur les conditions météorologiques et environnementales présentes au moment même de l'application (Dow AgroSciences, 2008).

Dans le cas du Disrupt Bio-Flake SBW, ce produit fait partie de la famille chimique des esters. La substance active, liquide et incolore, est déposée sur un support, un flocon de 3 mm par 3 mm biodégradable de couleur verte, s'apparentant à la couleur du feuillage des conifères (Hercon Environnemental, s.d.). Un agent collant est ajouté au flocon afin qu'au moment de l'application, ceux-ci se maintiennent au feuillage de la canopée. Étant donné que le Disrupt est une version synthétique de la phéromone de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, ce produit se disperse rapidement dans l'air, ce qui lui permet de se dissiper dans l'environnement. Des études ont démontré que l'ingrédient actif de ce produit aurait une très faible solubilité dans l'eau et n'aurait pas tendance à se lier chimiquement aux molécules présentes dans le sol. Les flocons servant de support à la substance semblent avoir un très faible impact sur l'environnement, à l'exception de la fonction pour laquelle le Disrupt est appliqué sur ceux-ci. Même si cette substance ne possède pas une solubilité notable, l'application sur ces plans d'eau est déconseillée. Cette mesure est instaurée afin de minimiser le risque potentiel que la faune aquatique entre en contact avec l'élément actif ou absorbe son support. De plus, une phytotoxicité pour les arbres hôtes n'est pas à prévoir puisqu'eux aussi servent davantage de support à la substance, qui n'entre pas dans l'organisme des végétaux. Selon l'étude du produit par l' Agence de réglementation de la lutte

antiparasitaire (ARLA) (2007), de faibles risques de persistance, de potentiel de bioaccumulation et de toxicité sont à prévoir dans l'environnement à la suite de son utilisation (Santé Canada, 2007).

2.4.2 Sur la faune

Des applications massives d'insecticide sur de grandes étendues peuvent affecter plusieurs organismes. L'environnement forestier est un écosystème en soi qui regroupe plusieurs formes de vie du règne végétal et animal. Il est donc possible qu'un traitement affectant seulement un groupe d'individus puisse engager un changement influençant d'autres populations interagissant dans ce même écosystème.

Bien que le Mimic^{TM} 240LV soit développé spécifiquement pour engager des mues létales chez certaines espèces, il est possible que d'autres espèces de papillons en soient affectées. Ce produit n'atteint pas spécifiquement la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Il est probable que des espèces de lépidoptères en ressentent moins les effets, mais les familles proches de la tordeuse peuvent être atteintes, même si celles-ci ne représentent pas une menace pour les forêts commerciales. Ces effets collatéraux sont encore méconnus et il est difficile d'estimer à quel point les espèces non ciblées de lépidoptères peuvent souffrir d'une telle application sur plusieurs hectares (Béchard, 2013).

Le tébufénozide serait relativement non toxique pour les abeilles. Il s'agit d'un autre ordre d'insecte qui pourrait être affecté par cet agent actif. Selon Dow AgroSciences (2008), la dose recommandée lors de l'application pour atteindre la tordeuse des bourgeons de l'épinette n'aurait pas d'effets sur les espèces non visées. Plusieurs espèces sont nommées, que ce soit des arthropodes terrestres ou aquatiques, des algues, des vers de terre, des crustacés, des poissons, des oiseaux, des amphibiens ou des mammifères. Bien que certaines espèces de ces groupes soient ciblées, les informations s'appliquent directement aux espèces mentionnées, cela peut donc varier selon la région de l'application. De plus, la fiche signalétique mentionne que le tébufénozide est très toxique pour les poissons, surtout lorsqu'ils sont jeunes, au stade alevin. C'est pourquoi il est important de maintenir les zones tampons lors de l'arrosage, tout en évitant de survoler des plans d'eau lors de l'application.

La tordeuse des bourgeons de l'épinette est un insecte à la base de la chaîne alimentaire et peut servir de nourriture pour certaines espèces d'oiseaux. Sur une base alimentaire, cet agent serait

pratiquement non toxique pour les oiseaux. Dans le même ordre d'idée, aucune donnée n'est disponible concernant le potentiel de bioaccumulation dans les organismes vivants (Dow AgroSciences, s.d.a).

Dans le cas du Disrupt Bio-Flake SBW, la phéromone synthétique utilisée est très spécifique et ne rejoins que la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Chaque espèce animale utilisant ce type de reconnaissance olfactive possède une odeur particulière et ne peut qu'être reconnue par les individus de la même espèce. Cela diminue grandement les risques d'interférence avec d'autres insectes dont les périodes de reproduction chevauchent celle de la tordeuse (Santé Canada, 2007).

La structure chimique de la phéromone ne présenterait pas de risque toxicologique pour les mammifères, les poissons et les oiseaux. Le flocon servant au support de la substance a été soumis à plusieurs tests en laboratoire qui ont mené à la conclusion que le matériel biodégradable utilisé pour sa fabrication n'est pas toxique pour les mammifères, les invertébrés aquatiques, les oiseaux et les poissons. Selon l'ARLA, l'ingrédient actif, le (E,Z)-11-tétradécenal ne poserait pas de risque suffisamment élevé pour les oiseaux et les poissons. Ces indications de seuil de toxicité sont applicables lorsque le mode d'application et la concentration de la substance sont respectés selon les recommandations du fabricant (Santé Canada, 2007).

La méthode d'application proposée par le mode d'emploi de cette nouvelle technologie fait en sorte qu'il est peu probable que des oiseaux ou des poissons ingèrent les flocons de Disrupt. La petite taille des flocons, leur texture et leur emplacement à la mi-couronne des arbres formant la canopée sont tous des facteurs soutenant cette affirmation (Dow AgroSciences, s.d.a).

Cependant, des questions restent quant à la situation où les flocons pourraient être absorbés par les oiseaux par erreur en les prenant pour des sources de nourriture telles des graines ou bien des insectes. Il est alors suggéré par l'ARLA que des études terrains dans des zones traitées pourraient permettre de statuer sur cette incertitude. L'organisme demande aussi qu'une étude en laboratoire sur le problème soit développée afin de déterminer si les oiseaux pourraient consommer le support sous forme de flocon lorsque celui-ci est présenté comme de la nourriture. Ainsi, des données de toxicité ou autres effets létaux sur la fin de vie utile du produit sur les oiseaux deviendraient disponibles. Par la suite, s'il s'avère nécessaire, des changements quant à la méthode d'application ou les doses utilisées pourraient être de mise (Santé Canada, 2007).

Les méthodes d'applications aériennes comportent un certain risque pour les espèces qui ne sont pas visées par ce traitement. En fonction de la distribution de la canopée sur le terrain en traitement, il est probable que des flocons enduits de Disrupt se retrouvent dans les plans d'eau environnants. Les risques supposés par les professionnels sur la faune aquatique se limiteraient à l'ingestion des flocons. Par contre, un risque faible d'intoxication pour la faune aquatique par l'agent actif du Disrupt pouvant se retrouver dans les lacs et rivières est envisagé (Santé Canada, 2007).

2.4.3 Sur la santé humaine

Le Mimic est homologué par le gouvernement canadien et est donc disponible et utilisable. Cependant, l'utilisation du Mimic™ 240 LV ou du Disrupt Bio-Flake SBW nécessite certaines précautions s'appliquant aux personnes qualifiées à épandre ces produits. De plus, des tests sur les effets possibles à long terme de l'utilisation de ces produits ont été expérimentés afin de bien documenter la toxicité de ces substances. Bien que l'agent actif d'un de ces produits de contrôle ait été homologué, cela n'inhibe en aucun cas le potentiel dangereux que ces substances peuvent avoir.

Les tests réalisés en laboratoire quant à l'absorption cutanée du tébufénozide utilisé dans le Mimic™ 240 LV ont permis d'attitrer la dose létale aiguë pour un rat à >2000 mg/kg. Il faut par contre >5000 mg/kg de tébufénozide pour un rat avant d'atteindre la dose létale par ingestion. La concentration atmosphérique maximale de ce même produit qui a pu être répliqué en laboratoire a été de 1,33 mg/L. À cette concentration, aucun effet néfaste par inhalation n'a été remarqué chez les animaux d'expérimentation. Quant aux tests de possibilité allergène effectués sur des cochons d'Inde, ceux-ci se sont avérés négatifs. Des effets chroniques peuvent survenir dû à une exposition excessive au tébufénozide. Chez les animaux de laboratoire, il a été observé qu'une telle surexposition pouvait causer une méthémoglobinémie. Cette pathologie se décrit comme une accumulation de méthémoglobine dans les globules rouges, une forme d'hémoglobine oxydée inapte au transport de l'oxygène, pouvant créer une asphyxie (Doctissimo, 2008 et Doctissimo, s.d.).

La glycérine entre aussi dans la composition de l'insecticide Mimic. Ce composé chimique est fréquemment utilisé dans le domaine pharmaceutique et est faiblement toxique. Cependant, des

effets sur le tractus gastro-intestinal, les reins et le foie ont été observés chez les animaux de laboratoire.

Le risque cancérogène du tébufénozide ne semble pas être élevé puisque la substance n'a pas causé de cancer chez les animaux testés. Il en va de même pour les anomalies congénitales et autres effets pouvant être répertoriés chez le fœtus. Les études animales concluent aussi que le tébufénozide n'aurait pas d'effet sur la reproduction. Le risque mutagène est resté négatif après des tests et *in vitro* sur cette même substance. (Dow AgroSciences, s.d.a)

L'ingrédient actif du Disrupt Bio-Flake, le 95/5 E/Z-11-tétradécenal, a lui aussi été testé en laboratoire selon un rapport toxicologique réduit. Il en est résulté que la dose létale pour un rat est de >5 mg/kg dans le cas où la phéromone serait ingérée (Hercon Environnemental, s.d.). Il a aussi été établi que la chaîne moléculaire composant la phéromone était insoluble et que la majorité des enzymes présents dans la plupart des organismes vivants avaient la capacité de la biodégrader. La phéromone utilisée est produite d'acide gras, ce qui impose que des risques minimaux, tout en ayant un effet perceptible à de faibles concentrations en ce qui concerne le contrôle parasitaire. Il est mentionné dans certaines recherches que le risque pour les humains d'être exposés à cette substance est faible puisque celle-ci reste centrée à un endroit grâce au flocon servant de support à la phéromone. Il est mentionné que les résidus ou bien les impuretés de ce même produit n'obtiennent pas de résultats toxicologiques nécessitant davantage d'information ou de données. D'autres expériences ou analyses basées sur l'ensemble des données disponibles ne démontrent pas de différence quant à l'exposition des enfants à cette substance, à celle des adultes. Le Disrupt ne démontre pas, selon le même type de recherche, que la substance active puisse altérer l'activité endocrinienne chez l'humain (Santé Canada, 2007).

Différentes données enregistrées par rapport aux substances sémiochimiques, substance propagée dans l'environnement par les végétaux ou les animaux en guise de signal (IRSEA, s.d.), ne rapportent aucun indice de toxicité chez les mammifères ayant été exposés à de fortes doses. Toujours selon les mêmes données, ce type de substance démontrerait une faible toxicité aigüe (LD_{50}>5000 mg/kg). Des résultats semblables en terme de toxicité cutanée et à l'inhalation ont été observés (LD_{50}>2000 mg/kg et LC_{50} généralement >5 mg/L). De plus, une faible irritation des yeux et de la peau a pu être démontrée à la suite d'analyses. Enfin, les tests effectués sur ce type de

substance chimique prouvent qu'il n'y a aucune évidence de conséquences mutagènes à la suite d'une exposition au produit (Santé Canada, 2007).

Le type de phéromone utilisée est biodégradable par les enzymes qui se retrouvent dans la majorité des organismes vivants. Celle-ci étant formée d'une longue chaine d'acides gras pourrait être métabolisée par la β— oxydation qui produirait la perte d'une série de paires de carbone ou bien par la complexation avec le glucorinide et qui serait excrétée par la suite par les reins (Santé Canada, 2007).

À la suite de ces observations, le gouvernement canadien ne juge pas nécessaire d'établir une dose journalière admissible (DJA) ou bien une dose aigüe de référence (DAR). Le manque inhérent de toxicité de la substance même et de ses résidus est à la base de cette déclaration (Santé Canada, 2007).

La structure du flocon, mesurant 3 mm par 3 mm, sert de support à la phéromone et est spécialement conçue pour laisser libérer cette dernière de façon progressive dans l'environnement. Un réservoir central, formé de deux couches extérieures, prend place dans cette structure. La phéromone s'y insère par la suite. Puis, celle-ci migre vers les abords du flocon, ce qui lui permet de rejoindre l'atmosphère.

Bien qu'une évaluation des résidus de nourriture n'ait pas été jugée pertinente, le Disrupt Bio-Flake SBW ne doit pas être appliqué à proximité ou bien dans des cultures alimentaires s'adressant soit aux humains ou aux animaux (Santé Canada, 2007).

3 OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE DU CHOIX DE L'OUTIL D'ANALYSE

3.1 Objectif de l'analyse

La venue de nouvelles technologies antiparasitaires dans le domaine de la foresterie peut être un progrès innovateur ou bien un projet comportant plus de désavantages que les produits permis et utilisés présentement pour contrer les épidémies de tordeuses des bourgeons de l'épinette. Afin d'établir les points forts et les points faibles des produits tels que le Mimic^{TM} 240LV et le Disrupt Bio-Flake SBW en comparaison avec la solution de bactérie *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki*, l'utilisation d'un outil d'aide à la décision en matière de développement durable sera construit. Cette analyse a pour principal objectif d'établir sur les plans du développement durable tels que l'environnement, l'économie et la sphère sociale, la possibilité que le régulateur de croissance (Mimic^{TM} 240LV) et la phéromone synthétique (Disrupt Bio-Flake SBW) puissent être des moyens de lutte plus efficace, sécuritaire et avantageux que le Btk.

3.2 Justification du choix de l'analyse multicritère comme outil d'aide à la décision

Plusieurs outils d'aide à la décision sont disponibles pour l'évaluation de différents projets en développement durable. Afin de déterminer l'outil le plus à même de donner une évaluation de confiance pour la situation à l'étude, trois facteurs essentiels sont à considérer : la finalité de l'évaluation, qui sera l'auteur de l'évaluation et le type de ressources disponibles. La finalité de la présente évaluation réside dans l'obtention d'une comparaison permettant de soulever quelle option de lutte antiparasitaire contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette concorde le mieux avec le développement durable. Pour ce faire, des pondérations seront attribuées aux critères choisis afin d'évaluer chacune des options, et ce, selon une méthode semi-quantitative. Les critères seront clairement établis et utilisés pour l'évaluation des trois options. Ces mêmes critères seront utilisés pour l'évaluation de chaque option, afin d'avoir une démarche homogène pour chacune d'elles. Par la suite, l'information provenant de différentes sources pourra permettre de justifier le pointage et les scores de chacun des choix soumis à cette évaluation. Dans le cas présent, le concept de développement durable s'est vu adapté à la foresterie, ce qui en fait l'idée centrale de l'évaluation. Cette étude sera basée essentiellement sur la littérature, qui peut être bonifiée par des connaissances d'experts externes. Bien que les technologies antiparasitaires traitées soient très récentes, l'information à leur sujet reste très accessible.

Enfin, l'utilisation de cet outil d'aide à la décision permettra de brosser un portrait exhaustif de la situation en départageant plusieurs solutions envisageables. En tenant compte de chacun des éléments traités précédemment, une comparaison adéquate est possible entre le Mimic^{TM} 240LV, le Disrupt Bio-Flake SBW et le Btk. Cela donnera des pistes pour planifier les interventions par l'utilisation de l'analyse multicritère. Sa simplicité d'utilisation et sa comparaison binaire des options traitées sont les principaux avantages retenus dans le cadre de cette étude. Bien que cet outil puisse sembler subjectif, la robustesse de ce test compense cette faiblesse. Cependant, les résultats de ce type d'étude ne sont pas sans faille. L'analyse multicritère n'apporte pas d'action concrète répondant au résultat obtenu. Celle-ci met en perspective des idées pouvant mener à une réflexion sur les actions à prendre pour obtenir le meilleur résultat (OFDT, 2004).

4 LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

4.1 Description des aspects environnementaux touchés

Le mode d'application des produits à l'étude est macro, donc réalisé à l'échelle des régions forestières touchées, ce qui peut en somme couvrir de grandes superficies. Bien que ces produits semblent avoir une action ciblée, il est possible que d'autres organismes vivants interagissent de multiples façons avec ces produits. De plus, bien que l'écosystème forestier soit la principale cible lors des arrosages, il va sans dire que l'écosystème aquatique présent au même endroit pourrait subir certains effets dus à ces substances. Soulever des aspects environnementaux prédominants pouvant être affectés par ce type de lutte antiparasitaire est à l'évidence très pertinent.

La littérature scientifique montre que le Mimic^{TM} 240LV est soumis à des restrictions pour éviter le contact du produit avec des milieux naturels ou des organismes vivants en particulier. Les références indiquent que la substance contenue dans cet insecticide est toxique pour les organismes aquatiques, ce qui justifie l'instauration d'une zone tampon, spécifiée dans le mode d'emploi du produit (Dow AgroSciences, s.d.a). D'autres précautions portant sur le nettoyage des outils et des installations reliées à l'utilisation du Mimic et l'élimination de déchets s'y rattachant établissent l'importance d'éviter que des réserves d'eau d'irrigation ou potable ne soient contaminées par ce produit (Dow AgroSciences, s.d.a). La fiche signalétique de la compagnie fabriquant le Mimic^{TM} 240LV émet un avis quant à la forte toxicité du produit pour les invertébrés aquatiques sur une base aigüe. Cet avis s'applique aussi aux alevins, toutes espèces confondues. La toxicité pour les poissons adultes est cependant plus faible. Aucune information n'est disponible concernant l'effet que le tébufénozide, l'ingrédient actif du Mimic, pourrait avoir sur les amphibiens (Durkin et Klotzbach, 2004). Des bioessais ont été réalisés sur plusieurs invertébrés aquatiques tels que la daphnie (*Crustacea*) et sur les moucherons (*Insecta*). Les résultats obtenus décrivent une toxicité moindre pour ces deux ordres d'insecte à certaines concentrations. Par contre, des préoccupations restent quant à des problèmes potentiels de reproduction testés chez ces mêmes espèces selon différentes doses de Mimic. Des tests réalisés sur des plantes aquatiques démontrent que certaines pouvaient être complètement insensibles à la présence de tébufénozide dans l'eau, tandis que d'autres sont affectées. Cependant, les plantes à l'étude restent moins sensibles que les invertébrés aquatiques pour des comparaisons semblables. À l'inverse, à certaines concentrations, le tébufénozide accroît la croissance des algues. Enfin, aucun

bioessai n'a été réalisé pour mesurer la toxicité du Mimic^{TM} 240LV sur les microorganismes aquatiques (Durkin et Klotzbach, 2004).

L'écosystème forestier est aussi un milieu complexe où les interactions entre la faune non ciblée par le Mimic^{TM} 240LV et celui-ci peuvent survenir. Bien que le risque ait été caractérisé de faible pour les mammifères terrestres, des risques semblables à ceux mentionnés dans la section 2.3.3 peuvent survenir. L'effet le plus sensible observé pour les mammifères est celui impliquant des changements dans la structure sanguine. À cet effet, le chien (*Canis sp.)* a été l'animal testé le plus sensible lorsqu'exposé à des concentrations précises, soit 50 ppm dans le régime alimentaire (1,8 mg/kg de poids corporel/jour) avec un niveau d'effet de 500 ppm (20 mg/kg de poids corporel/jour) à la suite d'une exposition d'un an. Le risque a aussi été caractérisé de faible pour les oiseaux, comme il a été exposé dans la section 2.3.2, où la contamination de ceux-ci se traduirait par l'ingestion de flocons servant de support au produit. Cependant, les études les plus poussées soulèvent des effets pour ces animaux au niveau de leur potentiel reproductif lorsque ceux-ci sont exposés au tébufénozide.

À des doses plus faible ou égale à 1000 ppm de tébufénozide, aucun effet sur la reproduction n'a été remarqué chez le canard colvert. Cependant, chez le Colin de Virginie, les résultats se sont avérés incompatibles. Des effets tels que la réduction du nombre d'œufs pondus et la viabilité des embryons ont été remarqués à des concentrations de 300 et 1000 ppm dans des études précédentes. Les plus récentes soulèvent ces effets à des concentrations de 100 ppm. Des discussions sont encore en cours afin de statuer sur la réelle dose qui engendre une toxicité notoire. Des effets relatifs à la reproduction ont aussi été observés chez les mammifères. Étant donné que les résultats diffèrent selon l'animal étudié chez les mammifères, mais plus particulièrement chez les oiseaux, les effets sur les capacités de reproductions restent préoccupants. Cette préoccupation est étudiée de façon quantitative chez les oiseaux, car ils sont plus vulnérables à la consommation de végétation, de poissons et d'insectes contaminés au tébufénozide dans une parcelle traitée au Mimic^{TM} 240LV (Durkin et Koltzbach, 2004).

De plus, le tébufénozide est une substance agissant sur l'hormone de mue la plus active, la 20-hydroyecdysone, commune chez plusieurs ordres d'invertébrés. L'effet de la substance active du Mimic^{TM} 240LV semble varier non seulement selon les ordres d'invertébrés, mais aussi selon les

espèces. Des études ont démontré que les différences entre les sensibilités au tébufénozide chez les insectes résidaient dans le nombre de liaisons aux récepteurs d'ecdysone. Les tests les plus pertinents ont été effectués sur les invertébrés présents dans la canopée et au sol forestier. Le principal résultat qui en est ressorti est qu'aucun effet sur l'abondance des populations ou bien sur la richesse n'a été noté sur les organismes autres que les lépidoptères, l'ordre des papillons. Par contre, des diminutions d'abondance ont été remarquées chez d'autres espèces de lépidoptères. Alors, bien que l'on estime que le Mimic^{TM} 240LV serait très spécifique, il est possible que des effets affectent d'autres espèces constituant le même ordre que les espèces ciblées. Bien que ce produit soit utilisé comme moyen de lutte dans divers habitats de type forestier, tel que des vergers, aucun effet n'a été remarqué chez les espèces d'acariens, d'araignées, de coléoptères et de punaises. Dans le même ordre d'idée, aucune mortalité n'a été observée chez les abeilles pour certaines doses de produits. Il est donc possible de penser que les pollinisateurs seraient moins sensibles à certaines concentrations lors des arrosages (233,98 mg/kg de poids corporel) (Durkin et Koltzbach, 2004).

La phéromone utilisée dans la composition du Disrupt Bio-Flake SBW comporte aussi plusieurs avertissements quant à son épandage destiné à la canopée forestière. Comme il a été traité dans la section 2.3.2, il est possible que ce produit se retrouve dans des plans d'eau près des sites d'arrosage si une zone tampon n'est pas maintenue autour de ceux-ci. Cependant, aucune étude n'a été réalisée sur les effets à court, moyen et long terme de la présence de cet insecticide dans les plans d'eau. Comme mentionnée dans la section 2.3.1, la faible solubilité de cette substance laisse la porte ouverte à certaines spéculations concernant les effets sur l'ensemble de la faune aquatique (Hercon Environnement, s.d.).

Puisque le flocon supportant le Disrupt reste majoritairement collé dans le haut de la canopée, peu d'animaux pourraient y avoir accès. En se référant à la section 2.3.2, les oiseaux pourraient vivre le plus grand risque d'être atteint par le Disrupt, et ce, par ingestion. Encore une fois, des études ont été commandées afin de bien définir les possibles conséquences liées à l'ingestion qui sont encore méconnues pour le moment (Hercon Environnemental, s.d.).

Comme il a été expliqué dans la section précédente 2.3.2, des effets sur les autres ordres d'insecte ou bien sur d'autres lépidoptères sembleraient minimaux. En effet, le signal olfactif engendré par

le Disrupt ne peut être reconnu que par les tordeuses des bourgeons de l'épinette. À ce moment, il est possible d'affirmer que les autres insectes présents dans le périmètre d'épandage ne seraient point affectés par cet insecticide (Santé Canada, 2007).

Dans le cas du Btk, son impact environnemental semble aussi être réduit. Comme il a été mentionné dans la section 2.1, la bactérie *Bacillus thuringiensis* est retrouvée à l'état naturel dans l'environnement, elle n'expose donc pas celui-ci à une nouvelle menace. Puisque celle-ci est présente dans les sols, les plans d'eau et sur la végétation, un ajout de cette bactérie dans l'environnement ne semble pas entraîner de conséquences notables (Santé Canada, 2009). Lorsque la bactérie se retrouve sur le feuillage des végétaux, comme lors d'épandage de Btk sur la canopée forestière, la protéine cristalline, soit l'endospore, prend d'un à quatre jours à être dégradée. Les facteurs régularisant cette dégradation sont l'exposition au soleil, la température et le déficit hygrométrique. Les rayons ultraviolets rendent inactifs près de 50 % des spores de la bactérie en seulement 30 minutes. La dégradation des spores est encore accélérée lorsque des conditions de faible humidité sont présentes dans l'environnement, cela rend les bactéries encore plus vulnérables aux rayonnements du soleil. Une deuxième application de cet insecticide lors de traitements contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette est souvent nécessaire puisque le Btk perd 50 % de son potentiel insecticide en seulement 1 à 3 jours. Cependant, une activité résiduelle de 10 jours a déjà été observée par des chercheurs. Aucun effet phytotoxique n'a été observé à la suite d'une application de Btk sur des végétaux. Le seul inconvénient relevé est une faible diminution de la pollinisation par les lépidoptères, empoisonnés par le Btk, et dont cet ordre d'insecte en est le principal agent. En milieu aquatique, cette bactérie ne persiste pas plus de 8 à 12 jours, selon des observations réalisées dans des cours d'eau et dans des réservoirs. Une différence survient en comparant la viabilité du Btk dans l'eau de lac et l'eau de mer : 50 % des bactéries étaient vivantes dans l'eau de lac après 70 jours, et 90 % des bactéries étaient mortes après 30 jours dans de l'eau de mer. Ceci s'explique probablement par la présence accrue d'éléments nutritifs dans l'eau de lac, plus que dans l'eau de mer. Le Btk ne semble pas avoir d'effet sur la qualité de l'eau et chez la majorité des organismes aquatiques, vertébrés et invertébrés.

Les lépidoptères, dont fait partie la tordeuse des bourgeons de l'épinette, sont une source de nourriture pour plusieurs animaux. S'il s'avérait qu'un poisson, un amphibien, un reptile ou un

oiseau ingérait des insectes intoxiqués par le Btk, il a été répertorié que ceux-ci n'en ressentiraient aucun effet. Des effets indirects sont à prévoir par la diminution de chenilles sur ces animaux qui peuvent être privés d'une source de nourriture. Les tentatives de nidifications chez une espèce d'oiseau, la paruline bleue qui est un migrateur néotropical, ont été marquées par une réduction. Cependant, chez la majorité des oiseaux, aucune différence entre une parcelle traitée et une parcelle non traitée ne permet d'observer une diminution des naissances, de succès d'accouplement et d'indice de croissance des jeunes durant la première année. Par contre, au cours de la deuxième année, la génération de larves décédées par le Btk l'année précédente ne permettait pas une affluence de nourriture suffisante, ce qui se traduisit par un nombre plus faible d'oisillons se rendant au stade de l'envol (Santé Canada, 2009 et Dugal, 1986).

Les tests d'innocuité faisant référence aux mammifères n'ont pas toujours obtenu de bons résultats. Ce qui a posé problème à l'époque des premières formulations de Btk, avant les années 70, contenait de la β-exotoxine. Cette substance peut être toxique pour les petits mammifères, car elle inactive plusieurs réactions en inhibant l'ARN polymérase. Lorsque cette exotoxine a été éliminée des mélanges, les tests sur les risques d'infection pour les petits et les grands mammifères obtenaient des résultats satisfaisants. Des expériences sur des moutons et des vaches par ingestion de Btk ont montré que les spores et les cristaux restaient intacts après un passage dans le tractus digestif de ces animaux, et ce, même lorsque des variétés de Btk contenaient de la β-exotoxine. Les spores et les cristaux survivent tout de même à ce passage, car ces structures sont demeurées viables lorsqu'elles ont été observées dans les fèces des animaux. Une autre étude sur des moutons traités avec deux sources de Btk, soit un groupe au Dipel® et un autre au Thuricide®, a permis de tester les effets chroniques d'inoculer le Btk dans l'alimentation de ces animaux. À raison de 500 mg/kg par jour pendant plus de 5 mois, aucun effet indésirable n'a été observé. Cependant, dans les deux groupes traités avec des produits de Bt différent, il est arrivé occasionnellement que les animaux souffrent de diarrhée et de selles molles. Ces symptômes n'ont malgré tout aucunement persisté pendant plus d'une semaine. Par ce test, il est possible d'affirmer que le Btk est une bactérie ne créant pas de conséquences par voie orale ni pulmonaire, celles-ci auraient pu être remarquées de par les habitudes alimentaires des animaux. Des cerfs ainsi que des lièvres ont aussi été exposés à de fortes doses de Dipel® sans toutefois présenter de symptômes sur leur santé. L'état acide des systèmes digestif des mammifères

contribue à la fragmentation des protéines cristalline, ce qui les rend non toxiques pour ces animaux (Santé Canada, 2009 et Dugal, 1986).

D'autres ordres d'insectes possèdent aussi un estomac alcalin, mais seuls les lépidoptères disposent de récepteurs s'adaptant à la protéine cristalline ce qui permet à celle-ci d'intoxiquer son hôte. Donc, si d'autres insectes ont un système digestif alcalin, mais ne sont pas munis de ces récepteurs, la toxine n'a aucun effet sur cet hôte. Cependant, près de 282 espèces de lépidoptères sont retrouvées au Québec et donc vulnérables au Btk. Une étude d'impact par rapport au Btk datant de 1992 souligne que seulement 10 espèces de papillons pourraient être présentes lors des périodes prévues d'épandage du pesticide, soit durant le mois de juin. De plus, la présence de ces espèces est aussi modulée par la présence de plantes qualifiées de rares en milieu forestier, donc il est possible d'affirmer que ces espèces n'ont pas pour habitat préférentiel les forêts québécoises. Étant donné que le Btk s'attaque aux larves des lépidoptères et que celles-ci doivent s'alimenter pour devenir infectées, les cycles de vie de ces 10 espèces vulnérables ne correspondent pas nécessairement avec la période d'épandage. Cela minimise encore une fois le risque d'impacts négatifs sur d'autres espèces d'insectes (SOPFIM, 2011). À tout le moins, une seule génération d'insecte, soit celle présente au moment de l'épandage, pourrait être affectée par la pulvérisation de Btk puisque son activité insecticide peut persister pendant une semaine ou plus (Santé Canada, 2009 et Dugal, 1986).

Chacun des produits antiparasitaires présentés s'applique à une dose permettant d'obtenir les résultats les plus probants possible dans la lutte à la tordeuse des bourgeons de l'épinette. En ce qui concerne le Mimic^{TM} 240LV, celui-ci est appliqué dans une concentration variant entre 50 et 70 g/ha (Dow AgroSciences, s.d.b). Le Disrupt Bio-Flake, pour sa part, est appliqué selon une concentration variant de 20 à 50 g d'ingrédient actif (a.i.) par hectare (HERCON, s.d.). Enfin, le Btk est aspergé sur les forêts à raison de 30 milliards d'unités internationales (BIU) par hectare (Bauce et autres, 2004). D'après des expérimentations visant à comparer les taux d'efficacité de ces trois solutions antiparasitaires, la figure 4.1 met en relief que le Mimic^{TM} 240LV procure un taux de mortalité de 98% des larves de stade 4 de TBE après la deuxième application. Ce produit surpasse le taux de mortalité induit par le Btk et ce, peu importe le nombre de larves de stade 4 présentes au moment de l'arrosage.

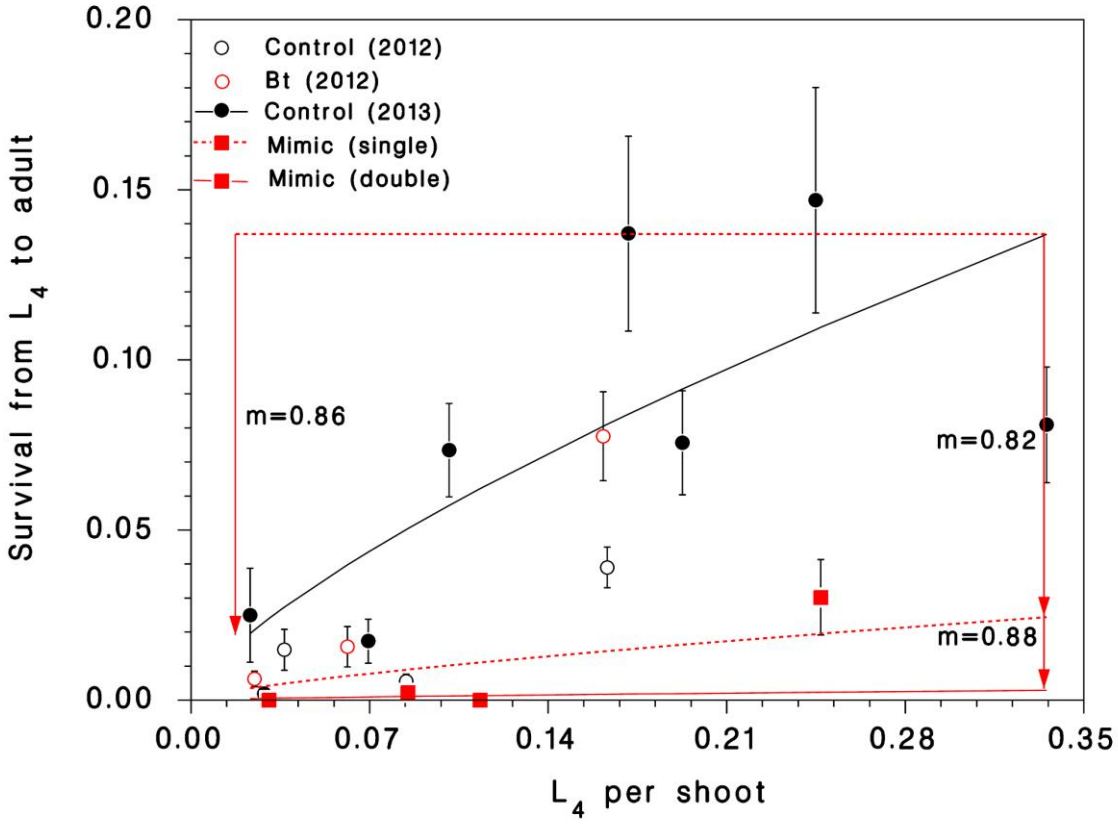

Figure 4.1. Taux de survie des larves de stade 4 de tordeuse des bourgeons de l'épinette lors d'application simple ou double de Mimic™ 240LV et de *Bacillus thuringiensis* au Bas-Saint-Laurent pour les années 2012 et 2013 (Tiré de Régnière, 2013c).

4.2 Choix des critères environnementaux du développement durable

Le développement durable, appliqué au domaine environnemental de la foresterie de la présente étude, peut avoir été défini de cette façon : « Utiliser des technologies permettant un contrôle antiparasitaire ayant de très faibles impacts sur l'écosystème et sur la faune qui le compose, tout en ayant une efficacité notable sur le problème à enrayer ». Afin de vérifier ces éléments, des critères se rapportant aux impacts précédemment relevés pour chacun des produits comparés ont été élaborés. Le tableau 4.1 présente les critères retenus aux fins de l'analyse.

Tableau 4.1. Critères d'évaluation concernant la sphère du développement durable de l'environnement

		Options à comparer		
Sphère du développement durable	**Critères**	**Mimic™ 240LV**	**Disrupt Bio-Flake SBW**	**Btk**
Environnement	1. Milieu aquatique			
	1.1 Impacts sur les invertébrés			
	1.2 Impacts sur les vertébrés			
	1.3 Impacts sur les végétaux			
	2. Milieu terrestre			
	2.1 Impacts sur les invertébrés			
	2.2 Impacts sur les vertébrés			
	2.3 Impacts sur les végétaux			

Le milieu aquatique

Les risques des différentes substances à l'étude sur le milieu aquatique peuvent affecter de différentes façons les êtres vivants dans cet écosystème. Les impacts se rapportant aux invertébrés aquatiques sont de plusieurs natures. Ce critère fait donc référence aux risques que les produits antiparasitaires étudiés nuisent à la survie de ces organismes vivants pour les doses recommandées par le fabricant lors des épandages. Les organismes vertébrés ne sont pas à l'abri de conséquences collatérales à l'introduction de ces produits dans l'environnement aquatique. Dans le cas des impacts pouvant survenir auprès des vertébrés, ce critère évalue la possibilité que les substances à l'étude nuisent à la survie de ces organismes, et ce, qu'importe le stade de croissance acquis par les organismes. Les végétaux aquatiques représentent aussi une strate de cet écosystème à ne pas négliger. Le critère faisant référence aux possibles impacts pouvant affecter ces végétaux juge si les produits en question peuvent enrayer ou augmenter à des niveaux excessifs la croissance de ces organismes. Enfin du point de vue environnemental, tous les organismes vivants ont besoin de cet élément essentiel, c'est-à-dire l'eau. L'épandage de produits de synthèse ou bien naturel dans l'environnement peut, malgré certaines dispositions fermes, rejoindre les sources d'eau potable ou bien altérer la qualité d'eau de ces sources. C'est ce que le dernier critère de cette section tentera de démontrer.

Milieu terrestre

Les épandages massifs d'insecticide sur de grandes superficies de forêts peuvent atteindre plusieurs autres organismes, même si les produits ont une cible spécifique. Les invertébrés autres que la tordeuse des bourgeons de l'épinette, qui est bien sûr l'espèce cible des produits à l'étude, peuplent autant la canopée de la forêt que le sol forestier. Ce critère éprouvera les possibilités que les insecticides traités puissent nuire à la survie des différentes espèces d'invertébrés présents dans le même écosystème que la tordeuse. Plusieurs animaux sont susceptibles d'entrer en contact avec ces substances. C'est pourquoi le critère concernant les impacts sur les vertébrés validera si ces produits antiparasitaires peuvent avoir des effets létaux ou modifiant la santé ou bien le cycle de vie de ceux-ci. Étant donné que les insecticides se déposent directement sur le feuillage des végétaux lors des épandages, comme le veut leur mode d'action, des hypothèses mentionnant des impacts sur les végétaux hôtes sont légitimes. De ce fait, le critère concernant ces impacts abordera la possibilité que les végétaux soient atteints dans leur cycle de croissance ou bien bioaccumulent les substances actives des insecticides. Finalement, bien que les produits restent en majorité dans la canopée, certaines quantités peuvent se retrouver au sol. Le critère se rapportant au sol évaluera les possibilités que le sol soit altéré dans sa structure et dans ses fonctions après un épandage de produits insecticides visés par cette étude.

5 LES ASPECTS ÉCONOMIQUES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

5.1 Description des aspects économiques touchés

La gestion des forêts canadiennes se fait tout d'abord selon les besoins de l'industrie forestière. Bien que cette activité économique soit très importante, la population en général porte aussi une attention pour ces écosystèmes pour les valeurs non ligneuses qui peuvent en être retirées (WRI, 2000). La tordeuse des bourgeons de l'épinette participe au rajeunissement des peuplements de conifères en s'attaquant aux arbres matures d'espèces préférentielles. Bien que ce rôle écologique soit totalement justifié, cet insecte entre directement en compétition avec l'activité économique reliée aux forêts en diminuant le volume de bois disponible pour la récolte. Cet état critique de défoliation engendré par l'insecte n'est obtenu qu'environ tous les 30 ans puisqu'un mélange de plusieurs facteurs non confirmés enclenche une explosion démographique des populations de tordeuse. La dernière épidémie recensée dans la province de Québec s'est déroulée de 1967 à 1992 (Fournier, 2009). Celle-ci a causé des pertes allant de 139 millions de mètres cubes à 238 millions de mètres cubes de bois résineux, soit de sapins et d'épinettes (MRN, 2013b).

La tordeuse des bourgeons de l'épinette va altérer le développement normal du sapin baumier, et d'autres conifères en défoliant le feuillage de l'année. Le sapin est une essence qui conserve son feuillage pendant plusieurs années, mais c'est le feuillage de l'année en cours qui contribue de façon plus importante (35 %) au processus de photosynthèse. La photosynthèse est le processus par lequel l'arbre va produire l'énergie nécessaire à la formation de ses feuilles, de ses branches, de ses racines et de ses organes reproducteurs. En ordre d'importance, le développement radial des branches n'est pas une priorité pour l'arbre. Donc, lorsque la tordeuse attaque le feuillage de l'année, cela diminue la quantité de feuillage apte et efficace au phénomène de photosynthèse. Cela engendrera alors pour l'arbre une diminution non seulement de feuillage, mais aussi de ses réserves. De plus, une diminution de la croissance radiale est à prévoir l'année suivante. Étant donné que le cycle de vie de la tordeuse l'amène à attaquer pendant plusieurs années consécutives les végétaux hôtes, ceux-ci subissent plusieurs impacts négatifs relevant de ces assauts. La majorité d'entre eux mène à une diminution, voire même l'arrêt complet de la croissance des arbres infectés. Au Québec, pendant près de 10 ans où des périodes de défoliation sévère se sont succédé dans des sapinières vieilles de 75 ans, la croissance en volume pour les arbres dominants a diminué de 50 % (Fournier, 2009).

Lors de la dernière épidémie québécoise, le bois a été rapidement récupéré et utilisé. L'avenue possible à ce moment était de vendre les arbres attaqués par la tordeuse des bourgeons de l'épinette à l'industrie des pâtes et papiers (MRN du Québec, 2013b). Cette solution permettait d'éviter la carie d'aubier, ce champignon se développant rapidement sur les arbres morts. Ce champignon atteint la matière ligneuse en engendrant une décoloration majeure, une diminution de la densité et une augmentation de la solubilité caustique du bois (RNCAN, 2011). De plus, la lignine, la cellulose et l'hémicellulose, principaux composés chimiques du bois, sont altérées à un degré semblable. Il va sans dire qu'à ce moment, les propriétés de la pâte créée à partir de bois attaqué par la tordeuse ne correspondent plus à celle façonnée à partir de matière ligneuse saine. Une diminution de qualité apporte alors des pertes économiques (Nlombi et Koran, 1988).

Bien que de grandes superficies forestières soient situées sur des terres publiques, beaucoup de propriétaires privés ont vu leurs lots ravagés par la tordeuse. Bien que des actions de prévention et de guérison d'une épidémie puissent être entreprises par les propriétaires, ceux-ci disposent, dans certains cas, de faibles moyens financiers et de main d'œuvre. Les pertes encourues par les infestations de tordeuses des bourgeons de l'épinette sur ces types de lots peuvent affecter économiquement à un autre degré les particuliers (Lafond, s.d. et Bellavance et Nadeau, s.d.).

L'industrie touristique peut aussi souffrir des attaques de tordeuses. Les paysages des parcs nationaux et fédéraux, en plus de toutes les autres organisations dont la forêt est la marque de commerce à la base d'activités rapportant des revenus, accumulent des pertes lors des épisodes de forte défoliation. Les activités reliées à la faune ou à la forêt rejoignaient près de 22,3 % des Québécois en 1987, et ce, sous forme de loisirs. La montée de popularité de ce type d'activité est de plus en plus remarquée depuis la dernière décennie. De ce fait, le tourisme passant par ce type d'activité est un moteur économique dans plusieurs régions du Québec. Toujours pour l'année 1987, près d'un milliard de retombées économiques aurait été atteint par le biais du tourisme associé à la forêt et aurait permis de maintenir 40 400 emplois dans ce domaine (SOPFIM, 1992).

Pour répondre à une attaque de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et ainsi épargner le plus de dommages possible, le Btk est pulvérisé sur les territoires forestiers publics atteints. Selon le *Code de gestion des pesticides* en vigueur depuis le 3 avril 2003, c'est le seul pesticide utilisé contre les ravageurs forestiers depuis l'engagement du gouvernement dans la stratégie de

protection des forêts consistant entre autres en l'élimination de l'utilisation de pesticides chimiques en forêt publique. Son utilisation varie en fonction de la sévérité de la situation épidémique (MDDEFP, 2012). Comme mentionné dans le chapitre 2, à la section 2.1, l'épandage de ce type de pesticide se fait par voie aérienne. Un aéronef muni d'un dispositif spécifique à la pulvérisation du produit est donc nécessaire. Afin d'obtenir le spectre de gouttelette adéquat, le système de pulvérisation doit être correctement calibré. Par la suite, des conditions météorologiques optimales doivent être observées afin de procéder à ce genre de pulvérisation en forêt. Des conditions de vent ne dépassant pas 16 km/h doivent se maintenir lors de la période d'arrosage. De plus, le feuillage des arbres doit être sec lors de l'application, ce qui signifie qu'il ne doit pas y avoir eu d'averse importante quelques heures avant la pulvérisation. Il est aussi important de noter qu'aucune précipitation ne doit survenir pour une période de 4 heures suivant l'épandage de Btk. Bien que ces conditions soient vérifiées en consultant des données météorologiques provenant d'une station météo mobile installée dans la zone à traiter, les territoires en voie d'être traités sont aussi survolés à basse altitude pour obtenir une deuxième validation des conditions atmosphériques mesurées par une station météo mobile située dans l'aéronef (SOPFIM, 2012). Cette méthode d'arrosage est celle utilisée dans le cas de pulvérisation de Btk, mais elle s'applique aussi au Mimic^{TM} 240LV et au Disrupt Bio-Flake SBW. Les frais afférents au matériel nécessaire sont coûteux, et ce, sans compter le salaire horaire du personnel spécialisé requis (Régnière, 2013b).

Le Mimic^{TM} 240LV se détaille à tout près de 50 $/ha pour la quantité de produits nécessaire au traitement de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Dans le cas du Disrupt Bio-Flake SBW, le montant s'élève à 200 $/ha. Pour ce qui est de la solution à base de *Bacillus thuringiensis*, celle-ci se chiffre aussi à 50 $/ha, pour les doses recommandées.

Il est vrai qu'appliquer un traitement antiparasitaire sur une forêt aux prises avec une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette permet de sauver plusieurs milliards de dollars, en fonction du niveau d'agressivité de la situation. À ce propos, afin d'assurer une rentabilité des actions entreprise à cet égard, il est recommandé que la surface à traiter représente moins de 40 % du territoire attaqué. Autrement, un retour sur l'investissement est impossible. Tous les frais reliés à l'élaboration et à la réalisation d'une stratégie d'intervention antiparasitaire sur de si grandes superficies ne peuvent égaler ou être moindre que les gains gagnés en forêt. De ce fait, la

prévention reste la solution la plus économiquement viable à long terme. En intervenant sur l'épicentre du problème au début de la manifestation d'une épidémie, il est possible de réduire les coûts d'intervention antiparasitaire, tout en minimisant les impacts perceptibles sur le territoire forestier (Régnière, 2013b).

5.2 Choix des critères économiques du développement durable

La définition de développement durable appliqué à l'économie d'une solution ou bien d'une action, tel que présenté pour le domaine forestier, s'illustre de cette façon dans le cas d'étude présentée : Les technologies utilisées doivent devenir rentable, c'est-à-dire, que leur coût de base puisse être rentabilisé par le gain en matière forestière saine et doivent permettre de maintenir des revenus intéressants pour la structure économique. Pour atteindre ces objectifs, des critères permettant d'illustrer le respect de cet aspect du développement durable ont été relevés pour chacun des éléments charnières de l'analyse économique. Ces critères sont exposés au tableau 5.1.

Tableau 5.1. Critères d'évaluation concernant la sphère du développement durable de l'économie

		Options à comparer		
Sphère du développement durable	**Critères**	**Mimic™ 240LV**	**Disrupt Bio-Flake SBW**	**Btk**
Économie	1. Santé de l'arbre			
	1.1 Amélioration de la santé de l'arbre à court terme			
	1.2 Amélioration de la santé de l'arbre à long terme			
	2. Mode d'action			
	2.1 Action de prévention			
	2.2 Action d'intervention			
	3. Rentabilité et accès			
	3.1 Facilité d'accès à la méthode d'intervention			
	3.2 Accessibilité économique de la méthode			
	3.3 Rentabilité de la méthode			

La santé de l'arbre

Lorsqu'un arbre-hôte est attaqué par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, les dommages causés aux pousses de l'année peuvent avoir plusieurs répercussions sur l'ensemble de l'organisme végétal. Il est possible, selon le cas, d'observer des améliorations sur cet aspect après un traitement visant à enrayer l'action épidémique de la tordeuse, comparativement à l'état postépidémique. Des changements peuvent survenir à court ou à long terme sur ce plan. En effet, les critères d'évaluation vont tenter de démontrer que les traitements étudiés peuvent amener l'arbre à se remettre d'un épisode épidémique.

Le mode d'action

Plusieurs méthodes de prévention ou de réaction sont disponibles face à un épisode de tordeuse des bourgeons de l'épinette. Elles varient passablement selon le propriétaire et la superficie forestière à traiter. Ces méthodes sont la plupart du temps reliées à l'épandage de pesticides. Les critères d'évaluation contenus dans cette rubrique tentent principalement de démystifier si les produits à l'étude peuvent agir en tant que solution préventive ou bien réactive à une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette. Il sera tenté de montrer sur quel plan chacune des substances à l'étude obtient un meilleur rendement.

La rentabilité et l'accès

Bien que plusieurs produits insecticides soient disponibles pour traiter les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette, nombre d'entre eux ne peuvent être utilisés à tout moment. Plusieurs contraintes régissent ces substances et ne laissent donc pas toujours la place au libre choix. De plus, les superficies forestières ne sont pas attribuées à un seul type de propriétaires, ce qui augmente alors la disparité entre les solutions envisageables puisque les moyens, autant financiers qu'en ressources humaines, peuvent varier grandement. La rentabilité des méthodes traitées dans cette étude sera aussi évaluée. Si celles-ci requièrent des moyens financiers considérables ou bien des ressources professionnelles pour sa mise en application, les ressources mobilisées comportent un coût et un effort plus faibles que les bénéfices qui en ressortiront. En somme, les trois critères d'évaluation de cette section demeurent la facilité d'accès, l'accès économique et la rentabilité des méthodes.

6 LES ASPECTS SOCIAUX DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

6.1 Description des aspects sociaux touchés

Le milieu forestier de la province de Québec, en plus des rôles environnemental et économique, soutient une réalité sociale divisée en plusieurs secteurs. Une dimension récréative de la forêt reconnue de nos jours conduit à y aménager diverses infrastructures pour supporter les activités de plein air, approche appréciée par la population. Encore aujourd'hui, une dimension spirituelle est perçue, et ce, particulièrement par les communautés autochtones qui y greffent la notion forte de subsistance sur les territoires forestiers. Enfin, la foresterie joue un rôle central dans l'occupation du territoire, reliée directement à la vitalité des communautés rurales. Toutes ces facettes viennent moduler le niveau de vie et le bien-être ressenti par toutes les communautés vivant ou profitant directement ou indirectement de la forêt.

Les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette peuvent affecter toutes ces composantes sociales. L'épidémie précédente a apporté son lot de turbulences. Lorsque l'industrie forestière subit une baisse de productivité, le tissu social s'en ressent. Au Canada, près de 300 collectivités dépendent de cette industrie dans une proportion d'au moins 50 %. Les effets d'une faille dans l'industrie première soutenant une communauté peuvent marquer pour plusieurs années les populations concernées. En somme, les principales causes pouvant créer des crises forestières sont bien à l'extérieur de la volonté des gens, sur lesquelles il est presque impossible d'agir (Mockler et Fairbairn, 2009).

Sous l'angle de la qualité environnementale du paysage, les épidémies sévères de tordeuse des bourgeons de l'épinette peuvent amener une perte de jouissance des espaces forestiers par les utilisateurs récréatifs. Un nombre impressionnant d'arbres morts dans les peuplements de sapins âgés est un effet impressionnant pouvant être observé lors de cette situation (MRN, 2013b).

Ce processus de défoliation pouvant mener à la mort peut prendre quelques années, mais tout au long de l'attaque, les arbres affichent de plus en plus des signes de faiblesse pouvant détériorer le paysage. Le temps de régénération requiert quelques années, et ne redonne pas le même paysage qui était présent au départ, selon la zone climatique où se situe l'épidémie. La succession forestière engendrée suite à une telle perturbation renferme normalement une forte proportion de sapin baumier, mais des bouleaux à papier et d'autres feuillus profitent aussi des grandes

éclaircies créées par les ravages de l'insecte. Donc, en plus d'observer des vides visuels autant sur des terres privées que sur les terres de la couronne dont la fonction récréative est reconnue, les épidémies de tordeuses façonnent un remaniement des essences forestières selon les zones climatiques attaquées (MRN, 2013b).

Tel que mentionné précédemment, des communautés québécoises dépendent de la ressource forestière puisque cette activité représente une source majeure d'emplois (SOPFIM, 1992). Cet aspect est primordial dans les prises de décisions concernant la gestion de la ressource forestière, dont la lutte contre les ravageurs fait partie (SOPFIM, 1992). Les communautés vivant de l'industrie forestière possèdent soit une scierie ou bien approvisionnent en matière première les scieries environnantes. De plus, ces communautés sont parfois peu populeuses, de l'ordre de 2000 habitants, et souvent, la majorité des personnes occupent un emploi relié à l'industrie forestière. Lorsque l'industrie subit des ralentissements, par exemple, une baisse d'approvisionnement en bois causée par une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette, les scieries arrêtent leurs activités étant dans l'impossibilité de couvrir leurs frais de production. Dans des situations épidémiques moins virulentes, les scieries peuvent seulement ralentir leurs activités, ce qui se traduit par des mises à pied temporaires ou des diminutions d'heures de travail. Cela affecte alors directement le bien-être des familles atteintes par ces impacts, pouvant rendre leur situation financière instable par moment. La plupart des travailleurs mis à pied profiteront des prestations d'assurances emploi en attendant la reprise des activités forestières, mais cela peut aussi amener un exode des résidents vers d'autres villes ou régions pour trouver de l'emploi à nouveau (SOPFIM, 1992). Par ailleurs, dû à cette instabilité d'emploi, les régions forestières peuvent avoir de la difficulté à retenir la main-d'œuvre spécialisée.

Alors, cette situation financière diminue la possibilité d'achat des familles en plus d'affecter leurs économies. Un autre effet pouvant découler de la diminution du pouvoir d'achat des résidents de ces communautés est de mettre aussi en péril les commerces locaux. Les commerces fournissant des biens et services sont particulièrement vulnérables lors des suspensions d'activités des scieries, puisque la population qu'ils desservent diminue leur demande. Plusieurs solutions peuvent permettre la survie de ces petits commerces en attendant le retour à la normale. Par exemple, cela peut se traduire par une diminution de l'inventaire ou un ajustement dans les services offerts, par une réduction des dépenses en diminuant le nombre d'employés, les heures de travail, le

temps supplémentaire ou bien les salaires et par une augmentation du crédit aux clients ou bien par une augmentation des heures d'ouverture (SOPFIM, 1992 et Mockler et Fairbairn, 2009).

Autre les effets de nature plus financière, des impacts psychologiques peuvent aussi être ressenti dans une population vivant de l'industrie forestière lorsque celle-ci subit une crise. Les situations financières précaires peuvent cacher des détresses psychologiques affectant le bien-être des gens des communautés forestières. Il est possible de discerner un mal tout autant collectif que personnel. Une gamme de malaises peut être ressentie par les gens affectés, pouvant aller du découragement à la dépression, et pouvant même aller jusqu'au suicide. Ces sérieux problèmes sont le lot des travailleurs subissant les hauts et les bas de l'activité forestière (Mockler et Fairbairn, 2009).

La section 2.4.3 relate les effets possibles sur la santé des mammifères, donc chez l'humain aussi. Les personnes restant le plus à risque d'être incommodés par les produits antiparasitaires traités dans cette étude sont les personnes responsables de leur manipulation. Le contact de longue durée et répétitif pourrait mener aux conditions propices à l'émergence de maladies ou de désagréments. Les consignes de sécurité énumérées dans la fiche signalétique de chacun des produits, lorsque suivies à la lettre, permettre de diminuer fortement le risque pour ces personnes de subir, de façon ponctuelle ou à long terme, divers désagréments reliés à la manutention de ces substances. En ce qui a trait aux gens susceptibles de se trouver dans la zone lors de l'épandage, les quantités dispersées sont de trop faible concentration pour occasionner des conséquences sur la santé, surtout de façon ponctuelle. En fait, les études toxicologiques réalisées sur le Mimic^{TM} 240LV ont comme conclusion des doses très élevées pouvant apporter des conséquences notables Le Btk ne possède aucune caractéristique pouvant amener à des problèmes de santé, excepté chez les insectes et particulièrement les lépidoptères (SOPFIM, 2011). De plus, dans le cas du Disrupt Bio-Flake, sa non-toxicité n'a pas poussé à l'élaboration d'une dose journalière admissible (DJA) ou bien d'une dose aigüe de référence (DAR) (Santé Canada, 2007).

Malgré les effets mentionnés ci-haut pouvant affecter le bien-être de ces populations rurales, un obstacle reste à surmonter : la perception d'un traitement aux pesticides appliqué à grande échelle sur des territoires forestiers. Aujourd'hui encore, les traitements insecticides servant à contrôler les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette peuvent heurter l'opinion

populaire. Les gens sont de plus en plus sensibilisés aux aspects environnementaux sur toutes les actions pouvant être entreprises pour résoudre divers problèmes. Dans le cas de la lutte aux ravageurs forestiers, il y eut longtemps des pesticides employés afin d'éviter le pire lors d'infestation d'insectes. Ces pesticides chimiques pouvaient être une source d'inquiétude pour les résidents à proximité des lieux d'épandage. En effet, des impacts sur la santé des gens, des animaux (autant sauvages que domestiques), sur la végétation et sur les plans d'eau éveillaient un doute quant à la totale sécurité de l'emploi de ce type de produits de synthèse. Les sections 2.1 et 2.4.3 ont relevé les incidences sur la santé humaine des produits insecticides traités dans cette étude. Il est possible de généraliser que ces produits ont un impact faible ou nul sur la santé. Par contre, les insecticides synthétiques ont très mauvaise presse auprès de la population. Beaucoup d'informations sont maintenant accessibles, de sources valables ou non, ce qui permet aux gens de se renseigner sur la situation à laquelle ils sont confrontés. L'inconvénient vient de la désinformation qui circule parmi toute la littérature disponible et à l'interprétation de l'information trouvée. Un sens critique et une légère connaissance du sujet peuvent cependant permettre de discréditer certaines sources. Ce problème peut apporter des frictions entre les parties prenantes d'action contre les ravageurs forestiers. Cette situation est présente dans plusieurs autres sphères d'activité ayant des impacts sur les populations et le vivant. Pour les scientifiques œuvrant dans le domaine de la lutte aux ravageurs forestiers, l'acceptation sociale des techniques utilisées et des produits insecticides employés demeure un défi dans les années à venir (Régnière, 2013b).

6.2 Choix des critères sociaux du développement durable

L'aspect social, selon le concept de développement durable, peut regrouper plusieurs idées et plusieurs angles différents sous lesquels ceux-ci peuvent être traités. Dans le cas présent, l'aspect social est défini par rapport au domaine forestier de cette façon: les technologies et les pratiques utilisées pour la lutte aux ravageurs forestiers créent-elles des inconvénients pour certaines activités pratiquées par des gens, des impacts directs ou indirects sur la santé du vivant ou bien des impacts sur le bien-être des populations vivant principalement de l'activité forestière. Afin d'évaluer et quantifier cet aspect du développement durable, des critères ont été développés au tableau 6.1.

Tableau 6.1 Critères d'évaluation de la sphère sociale du développement durable

		Options à comparer		
Sphère du développement durable	**Critères**	**Mimic™ 240LV**	**Disrupt Bio-Flake SBW**	**Btk**
Social	1. Qualité du paysage			
	1.1 Protection du paysage à moyen terme			
	1.2 Jouissance du paysage			
	2. Bien-être des populations vivant de l'activité forestière			
	2.1 Diminution de la qualité de la situation financière			
	2.2 Diminution de la qualité de vie			
	2.3 Perception sociale de l'acceptabilité de la méthode ou des produits			

Qualité du paysage

Les régions forestières exposent des vues à couper le souffle. Plusieurs de ces territoires délimités et accessibles à la population pour y pratiquer toutes sortes d'activités. Les épidémies de tordeuses des bourgeons de l'épinette, lors d'épisode sévère, affectent l'allure des arbres. Il est possible d'assister à une dégénération importante du paysage atteint, de là l'élaboration du critère sur la protection du paysage. De plus, cette situation affecte le niveau de jouissance des activités récréatives pouvant être pratiquées par la population en général sur ces territoires prévus à cet effet. La défoliation sévère des arbres rend le paysage moins bucolique et peut diminuer la biodiversité observable à ces endroits. Le critère décrivant l'utilisation du territoire forestier, donc la jouissance de celui-ci par les communautés, tentera d'exposer comment les produits étudiés peuvent permettre d'éviter une forte dégradation du paysage, et ainsi amoindrir l'impact sur les activités récréatives et sportives.

Le bien-être des populations vivant de l'activité forestière

La perte d'arbres matures et exploitables par l'industrie forestière peut engendrer différents types d'impacts affectant directement ou indirectement le bien-être des communautés locales vivants de cette exploitation. Bien que les travailleurs directement reliés à l'industrie soient les premiers à en ressentir les effets, les commerçants locaux en viendront aussi à dénoter des changements dans les habitudes de vie des résidents. Une situation financière précaire demande bien des ajustements pour chacun des salariés impliqués. Le critère décrivant la situation financière tentera de démontrer quel traitement semble le plus efficace pour éviter de trop grands creux financiers dans la vie personnelle des travailleurs du domaine et de ceux y étant reliés. Ces impacts financiers semblent inévitablement venir avec une certaine détresse psychologique dans les crises forestières les plus sévères. Les gens deviennent fragiles psychologiquement puisque leur bien-être dépend en grande partie de leurs revenus. Il est possible d'observer des symptômes de divers degrés, allant jusqu'à la maladie mentale. La santé physique altérée par l'utilisation de ces produits est aussi un point pouvant amener à une baisse de la qualité de vie. Alors, le critère relié au bien-être des populations permettra d'établir quel traitement antiparasitaire pourrait diminuer l'incidence de ces symptômes mentaux ou physiques. Enfin, l'aspect d'acceptabilité sociale tentera d'être exprimé par le biais de ce critère. Il sera tenté d'interpréter quel produit pourrait susciter le moins d'opposition dans son utilisation.

7 ANALYSE MULTICRITÈRE SELON LES PRINCIPES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

7.1 Méthodologie de l'analyse multicritère de l'étude

Une grille d'analyse multicritère a été développée pour tenir compte des volets environnemental, économique et social. Elle permet de comparer la performance de développement durable du MimicTM 240 LV, du Disrupt Bio-Flake SBW ainsi que du *Bacillus thuringiensis,* la seule méthode insecticide présentement utilisée sur les forêts publiques.

Ces grilles ont été développées dans chacun des chapitres se rattachant à un aspect du développement durable, avec mention des critères retenus aux fins d'analyse. La cotation de la valeur de chacune des dimensions du DD attribue une valeur équitable à chacune d'entre elles pour éviter qu'un élément soit avantagé et aussi montrer de façon intrinsèque chacune des valeurs des dimensions. Cette méthode permet aussi de poser sur une base égalitaire chaque sphère, car celles-ci diffèrent en nombre de critères d'évaluation. De cette façon, la valeur totale de l'ensemble des dimensions atteint 100 %. L'environnement, l'économie et le social se voient donc attribuer des poids identiques de 33,3 %.

L'analyse attribuera un pointage à chacun des critères selon une échelle de performance. Cette échelle de trois niveaux (faible, moyen et fort) identifiera le ou les produits de contrôle antiparasitaire le plus durable contre le ravageur forestier qu'est la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Au final, le ou les produits ayant davantage de pointage représenteront des solutions plus durables.

Une performance faible fera référence au fait que la dimension du développement durable qualifiée est peu respectée ou encore que les conséquences sur le milieu sont soit négatives, nulles ou peu perceptibles. Si malgré une analyse du critère des incertitudes restent flagrantes, cette valeur sera accordée au critère en question. Une performance moyenne sera attribuée aux critères dont la dimension du développement durable est représentée lors de l'analyse ou que seuls certains éléments sont pris en considération. Le critère en évaluation devra donc démontrer des conséquences positives sur le milieu, bien que des doutes subsistent quant aux inconvénients pouvant survenir. Enfin, une performance forte annoncera que le critère analysé respecte et assimile les concepts du développement durable dont des conséquences positives et marquantes pourront être observées sur le milieu.

Tableau 7.1. Définition de l'échelle de performance de la grille d'analyse multicritère

Performance	Valeur	Signification
Faible	1	La dimension du développement durable est peu respectée, il reste des incertitudes flagrantes et les conséquences sur le milieu sont négatives, nulles ou peu perceptibles.
Moyenne	2	La dimension du développement durable est représentée et certains aspects sont pris en considération, apportent des conséquences positives sur le milieu, mais comportent des doutes quant à des incertitudes ou des inconvénients.
Forte	3	La dimension du développement durable est respectée sur une forte proportion des aspects et les conséquences sur le milieu sont positives et marquantes.

Le total des points va produire une moyenne pondérée par dimension qui sera additionnée afin de donner un pointage total regroupant les trois aspects du développement durable.

7.2 Analyse des résultats

La présente section expose les résultats obtenus de l'analyse multicritère selon les trois aspects du développement durable, soit l'environnement, l'économie et le social. L'analyse a permis de comparer les résultats des trois produits de contrôle antiparasitaire utilisés contre les populations épidémiques de tordeuse des bourgeons de l'épinette. Un total de 18 critères est présenté à travers les trois dimensions. La définition de chacun des critères utilisés a été présentée dans le chapitre correspondant au volet traité (chapitres 4, 5 et 6) afin d'établir la base sur laquelle repose l'analyse développée dans la prochaine section.

7.2.1 Analyse environnementale

Tableau 7.2. Résultats d'évaluation concernant la sphère du développement durable de l'environnement

		Options à comparer		
Sphère du développement durable	**Critères**	**Mimic™ 240LV**	**Disrupt Bio-Flake SBW**	**Btk**
Environnement	1. Milieu aquatique			
	1.1 Impacts sur les invertébrés	1	2	2
	1.2 Impacts sur les vertébrés	2	2	2
	1.3 Impacts sur les végétaux	2	1	3
	2. Milieu terrestre			
	2.1 Impacts sur les invertébrés	2	3	2
	2.2 Impacts sur les vertébrés	2	1	3
	2.3 Impacts sur les végétaux	2	3	3
Total		**11**	**12**	**15**

La sphère du développement durable concernant l'environnement a été évaluée selon six critères, dispersés à travers deux thèmes, soit le milieu aquatique et le milieu terrestre. Les critères associés au milieu aquatique sont les impacts sur les invertébrés, les impacts sur les vertébrés et les impacts sur les végétaux. La sphère de l'environnement dans la présente analyse se définit par l'utilisation des technologies permettant un contrôle antiparasitaire ayant de très faibles impacts sur l'écosystème et sur la faune qui le compose, tout en ayant une efficacité notable sur le problème visant à être enrayé. Les trois premiers critères se retrouvent aussi dans la section sur le milieu terrestre. Pour cette étape, le pointage final maximal est de 18 points. Le Mimic™ 240LV obtient un pointage de 11, le Disrupt Bio-Flake SBW obtient 12 points et le *Bacillus thuringiensis* termine avec 15 points.

Tout d'abord, le MimicTM 240LV et le Disrupt Bio-Flake SBW ont tous deux obtenu une valeur de 1 pour le critère d'impacts sur les invertébrés du milieu aquatique. Dans le cas du Mimic, dont

l'ingrédient actif est un régulateur de croissance chez les invertébrés (le tébufénozide), il a été démontré qu'une toxicité aigüe affecte ce type d'organisme. Bien que les doses recommandées dans le contrôle des insectes ravageurs ne semblent pas concorder ou bien atteindre dans certaines circonstances les doses problématiques rencontrées lors des bioessais, un doute plane quant aux conséquences sur la reproduction chez les espèces testées. Les bioessais réalisés couvrent autant l'ordre des crustacés (*Crustacea*) que des insectes (*Insecta*), qui peuplent le milieu aquatique. Comme il a été mentionné dans la section 2.4.1, la persistance de l'ingrédient actif du Mimic dans l'eau est considérable. C'est pourquoi les conditions météorologiques et environnementales sur lesquelles les zones tampons ont été basées doivent être présentes afin d'éviter le plus possible la dérive de ce produit dans l'environnement. C'est pour cette raison que le Mimic^{TM} 240LV s'est vu attribuer une valeur de 2, puisque le produit présente tout de même un risque modéré d'impact sur l'écosystème aquatique. Pour ce qui est du Disrupt Bio-Flake SBW, la valeur de 2 établie pour ce critère se justifie par sa faible solubilité et persistance dans l'eau. Par ces propriétés chimiques, le Disrupt démontre un faible risque de bioaccumulation et de toxicité pour la faune aquatique. Le matériel composant le flocon servant de support à la substance active est lui aussi non toxique pour les invertébrés aquatiques. Malgré ces résultats, un risque faible de toxicité comporte tout de même un risque qui n'a pas été démontré jusqu'à présent par des études scientifiques. C'est pourquoi un résultat de 2 a été attribué à cette technologie. Le *Bacillus thuringiensis* a pour sa part obtenu une valeur de 2 pour ce critère. Puisque la bactérie est déjà présente dans l'environnement aquatique, un ajout de ce microorganisme ne semble pas engendrer des conséquences notables sur ce milieu. De plus, cette bactérie se dégrade complètement dans un délai de 8 à 12 jours, ce qui la rend peu persistante. Ces informations du peu de conséquences sur l'écosystème démontrent que le Btk s'accorde avec plusieurs aspects du développement durable.

En ce qui concerne les impacts pouvant affecter les vertébrés, deux méthodes de contrôle antiparasitaire sur trois ont obtenu le même résultat, soit une valeur de 2. Un risque caractérisé de faible dans le cas du Mimic^{TM} 240LV peut cependant créer de lourdes conséquences pour les êtres vivants lorsque de fortes doses sont dispersées dans un écosystème. En milieu aquatique, ce sont particulièrement les alevins, toutes espèces confondues, qui sont les plus sensibles à une intoxication aigüe au tébufénozide. Lorsqu'il s'agit des poissons adultes, une plus faible toxicité a

été rapportée lors d'études. Cependant, aucune donnée n'est disponible sur les effets possibles sur les amphibiens, ce qui s'avère une faiblesse. En ce qui concerne les oiseaux aquatiques, des effets sur la reproduction ont pu être relevés lors d'exposition d'animaux à de fortes doses de Mimic^{TM} 240 LV. Les canards colverts ne semblent pas sensibles à ce produit insecticide, puisqu'aucun effet sur la reproduction n'a été observé en dessous de 1000 ppm. Par contre, d'autres espèces aviaires réagissent à l'exposition à l'ingrédient actif du Mimic. Ces informations forcent l'attribution d'une valeur de 2 pour ce critère puisqu'il est impossible d'écarter un possible risque pour la santé des vertébrés aquatiques. Le même résultat est attribué pour le Btk. Les nombreuses études et l'expertise développée par de nombreuses années d'utilisation permettent d'affirmer que le Btk ne semble pas avoir d'effet négatif sur la majorité des organismes aquatiques. Le Disrupt Bio-Flake SBW obtient une valeur de 2 à ce critère puisque l'ingrédient actif composant la phéromone synthétique ne présente pas un risque suffisamment élevé pour la santé des poissons et des oiseaux. Ces indications sont, par contre, seulement applicables lorsque le mode d'application et les concentrations suggérées respectent les recommandations du fabricant. Cependant, des interrogations restent dans le cas où les flocons pourraient être absorbés particulièrement par les oiseaux qui pourraient les confondre avec une source de nourriture. À ce propos, des études ont été commandées afin de pouvoir quantifier de façon réelle le risque encouru. C'est donc cet aspect qui vient moduler la valeur accordée à ce critère.

Les végétaux aquatiques sont aussi exposés à subir les soubresauts de l'ajout d'un produit de contrôle antiparasitaire. Pour ce critère, les résultats sont assez partagés. Le Mimic^{TM} 240LV s'est révélé très extrémiste dans ses effets sur les végétaux lors de tests en laboratoire. Les chercheurs ont pu remarquer que certaines espèces de plantes pouvaient être totalement indifférentes à la présence de ce produit dans leur environnement, alors que d'autres pouvaient réagir fortement en augmentant leur taux de croissance. Ces informations permettent d'attribuer une note de 2 au Mimic pour ce critère, car une surcroissance de végétaux, tels que des algues, peut mener à l'apparition d'effets négatifs dans l'écosystème aquatique. Le Disrupt Bio-Flake SBW se retrouve avec un résultat de 1 pour l'absence d'information sur les effets possibles sur les végétaux dans un environnement aquatique. Le Btk obtient un score de 3 puisque la bactérie active ne représente pas un agent de changement pour les végétaux aquatiques

Dans la thématique des critères en milieu terrestre, les impacts sur les invertébrés sont abordés sous un autre angle. Les produits antiparasitaires à l'étude ont pour but premier de nuire à la tordeuse des bourgeons de l'épinette, mais d'autres invertébrés peuvent être affectés par la présence de telles substances. Bien que l'ordre d'insecte en question soit les lépidoptères, des tests de toxicité concernant le Mimic^{TM} 240LV effectués sur les invertébrés d'autres ordres présents dans la canopée et sur le sol forestier ont démontré que la richesse et l'abondance de ces populations n'étaient pas altérées par la présence de ce produit dans l'environnement. Cependant, d'autres espèces de lépidoptères peuvent en ressentir des effets négatifs, tels que des diminutions d'abondance. Une valeur de 2 a été accordée au Mimic pour ce critère, puisque même si son rayon d'action est spécifique aux lépidoptères, d'autres espèces du même ordre peuvent subir des conséquences négatives suite à l'épandage de cette substance dans l'environnement forestier. Le Disrupt Bio-Flake SBW ne semblerait pas induire de changement notable dans le mode de vie d'autres insectes. En effet, ce signal olfactif ne peut être reconnu que par les membres d'une même espèce. En considérant cette information, le Disrupt obtient un pointage de 3 pour ce critère, puisqu'il ne nuit pas à d'autres. Dans le cas du Btk, plusieurs facteurs font en sorte qu'un risque minimum est à prévoir pour les invertébrés lors de son utilisation. Le facteur majeur diminuant les risques d'intoxication est le fait que seul l'ordre des lépidoptères, représentés par près de 282 espèces au Québec, possède des récepteurs permettant à la protéine cristalline du *Bacillus thuringiensis* d'intoxiquer son hôte. Les autres insectes ne s'en trouvent alors aucunement affectés. Par contre, des interférences avec d'autres espèces de lépidoptères sont possibles. Bien que les périodes d'épandage de ce pesticide ne coïncident pas nécessairement avec les cycles de vie d'autres espèces, un risque persiste quant au fait que des stades larvaires d'autres espèces de lépidoptères pourraient être affectés. Ceci explique donc la valeur de 2 attribuée au Btk pour ce critère.

Le Mimic^{TM} 240LV a reçu une valeur de 2 pour le critère concernant les impacts possibles sur les vertébrés. Des changements à la structure sanguine ont été observés chez le chien en laboratoire ce dernier étant l'animal le plus sensible à ce produit. Il est alors possible qu'à une certaine concentration, d'autres mammifères subissent les mêmes conséquences. Des effets sur le potentiel reproducteur d'espèces aviaires ont aussi été testés. En somme, l'enjeu se situe surtout au niveau des concentrations pouvant mener à l'apparition de ces effets. Bien que les doses

limites sont plutôt élevées et donc, moins susceptible de se retrouver dans l'environnement suite à un épandage, le risque est tout de même considéré faible. C'est alors ce qui justifie le pointage attribué pour ce critère. Dans le cas du Disrupt Bio-Flake, les oiseaux seraient plus vulnérables à ce produit, et particulièrement à l'ingestion du support, soit le flocon. Le matériel composant le flocon est biodégradable et non toxique autant pour les mammifères que pour les oiseaux. Cependant, les études ne sont pas encore disponibles quant aux effets alors plus physiques que pourrait avoir cette substance lors de l'ingestion par un oiseau, ce qui supporte le pointage de 1 pour ce critère. Des effets notoires sur les premières versions de l'insecticide au Btk avaient été relevés, mais aujourd'hui, ceux-ci ont été contrôlés et compris. C'est pourquoi celui-ci est maintenant sans danger d'utilisation pour les vertébrés. Une note de 3 a donc été attribuée à ce produit pour ce critère.

Enfin, un score parfait est obtenu pour deux des trois produits de contrôle antiparasitaire pour le critère d'impacts sur les végétaux terrestres. En effet, le Disrupt Bio-Flake SBW et le Btk n'influent pas sur les végétaux, même si ceux-ci sont utilisés comme supports dans l'environnement forestier. Ils n'en ressentent aucun effet négatif. Les substances actives ne sont pas compatibles avec l'organisme des végétaux, ce qui soutient la théorie d'aucun effet notable sur des organismes non ciblés. Dans le cas du Mimic^{TM} 240LV, des études ont démontré une persistance de 44 jours dans le tronc ou les branches ou bien le feuillage des conifères. Cela ne semble pas occasionner de changements dans le cycle de vie des arbres, mais le produit réussi tout de même à intégrer l'organisme végétal. Pour cette raison, le Mimic reçoit une valeur de 2 pour ce critère.

7.2.2 Analyse économique

Tableau 7.3. Résultats d'évaluation concernant la sphère du développement durable de l'économie

		Options à comparer		
Sphère du développement durable	**Critères**	**Mimic™ 240LV**	**Disrupt Bio-Flake SBW**	**Btk**
Économie	1 .Santé de l'arbre			
	1.1 Amélioration de la santé de l'arbre à court terme	2	2	2
	1.2 Amélioration de la santé de l'arbre à long terme	3	3	2
	2. Mode d'action			
	2.1 Action de prévention	2	2	2
	2.2 Action d'intervention	3	3	1
	3. Rentabilité et accès			
	3.1 Facilité d'accès à la méthode d'intervention	1	1	3
	3.2 Accessibilité économique de la méthode	3	2	3
	3.3 Rentabilité de la méthode	2	2	1
Total		**16**	**15**	**14**

L'évaluation du développement durable en relation selon la sphère économique est présentée en trois sections qui regroupent au total sept critères. En premier lieu, la santé de l'arbre sera analysée en fonction de l'amélioration de la santé de l'arbre à court terme et à long terme. Ensuite, une section s'appliquant au mode d'action évalue si les produits à l'étude relèvent davantage de la prévention ou de l'intervention. Enfin, une section aborde les sujets de rentabilité et d'accès aux méthodes proposées en évaluant leur facilité d'accès, l'accessibilité et leur rentabilité économique. La définition s'attachant à ce volet du développement durable évalue si les technologies utilisées sont rentables, donc que leur coût de base est rentabilisé par le gain en matière forestière saine qui maintient des revenus intéressants pour la structure économique. Le pointage maximal pouvant être atteint pour cette partie est de 21 points. Au final pour cette

analyse, le MimicTM 240 LV obtient un pointage de 16, le Disrupt Bio-Flake SBW termine avec un pointage de 15 et le Btk suit avec un pointage de 14.

Les substances à l'étude ont sans contredit des effets positifs dans le contrôle des épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette. La différence survient avec le facteur temps de réaction. En effet, dans le cas du Mimic^{TM} 240LV, la valeur de 2 qui lui a été accordée pour le critère d'amélioration de la santé de l'arbre à court terme est justifiée par le fait que cet insecticide engendre la mort d'une génération dans une forte proportion après la première année de traitement (taux de mortalité de 82 % après une première application). Il en va de même pour le Disrupt, puisque ce produit à l'étude a aussi montré des perspectives intéressantes quant à la confusion sexuelle. Il est possible d'affirmer que celui-ci peut induire un saut dans les générations à venir en diminuant la proportion d'adultes qui auront réussi à s'accoupler, ce qui explique sa note de 2. En ce qui concerne le Btk, un état épidémique à ses débuts peut être contrôlé par ce produit de façon efficace même si celui-ci est considéré comme étant moins létal. C'est pourquoi un résultat de 2 lui a été attribué. Le maximum de points n'a pu être alloué à aucune des méthodes étudiées puisque des risques notables sur l'efficacité du produit perdurent. En fait, l'épandage et donc l'efficacité de ces produits dépendent fortement des conditions météorologiques (précipitations avant ou après l'épandage) et environnementales (température, niveau d'ensoleillement) au moment même de l'arrosage et dans les heures qui suivent. Ce sont donc des contraintes hors du contrôle des personnes responsables des procédures qui mettent à risque l'efficacité des traitements.

Le Mimic^{TM} 240LV et le Disrupt Bio-Flake SBW ont obtenu un résultat de 3 pour le critère d'amélioration de la santé de l'arbre à long terme. En effet, les pronostics de ces deux nouvelles substances à l'essai offrent des perspectives positives à long terme si l'on se fie, pour le Mimic au taux de mortalité et pour le Disrupt, à la réduction du nombre de femelles accouplées. Même la combinaison de ces deux traitements dans le but de contrôler une population épidémique augmente la réussite du procédé. Il est alors possible d'affirmer que ces substances seraient en mesure d'éviter une forte perte d'arbres de qualité pour l'activité forestière. Le *Bacillus thuringiensis* pour sa part obtient un résultat de 2 pour ce même critère. Les études montrent que les épisodes épidémiques sévères ne semblent pas être contrôlés par un traitement antiparasitaire

de ce type, qui est beaucoup moins létal pour les larves de tordeuses des bourgeons de l'épinette. C'est ce qui explique ce résultat devant l'incertitude de l'efficacité de cette méthode.

Les mêmes raisons expliquant l'amélioration de la santé de l'arbre à court et à long terme dirigent le pointage attribué pour les trois produits. Le critère d'action de prévention vise des résultats lorsque les populations inquiétantes de tordeuse ne sont pas encore problématiques, mais qu'il est tenté de les garder à un niveau endémique. C'est le contraire pour le critère d'action d'intervention, qui lui évalue comment les produits peuvent mener à une diminution des populations considérées épidémiques. À l'exception du *Bacillus thuringiensis* qui se retrouve avec un pointage de 1 pour le critère d'action d'intervention, le même pointage que pour le critère précédent est observable pour les substances à l'étude. Ceci s'explique par le fait que le Btk ne semble pas être une stratégie agressive envers les situations épidémiques de tordeuse. Les conditions météorologiques et environnementales, la durée de vie, le taux d'application et l'âge de l'insecte font en sorte que le rendement de cette méthode est trop dépendant de ceux-ci, apportant une incertitude. Lorsque le traitement se base sur une bactérie, contrôler la survie de l'élément actif devient plus ardu dans certains cas.

En ce qui a trait à la rentabilité et à l'accès des méthodes d'intervention étudiées, le Mimic^{TM} 240LV et le Disrupt Bio-Flake ont tous deux obtenu un résultat de 1. Ce résultat s'explique par le fait que ces produits font encore l'objet d'études. De plus, selon le *Code de gestion des pesticides*, ces produits ne sont pas éligibles à un épandage puisque ceux-ci constituent des pesticides chimiques. Il est donc impossible pour le moment de se les procurer. Le résultat de 3 octroyé au Btk pour le même critère provient du fait qu'il soit le seul insecticide biologique autorisé par le *Code de gestion des pesticides* pour le contrôle des ravageurs en forêts publiques. Il est donc le seul produit facile d'accès pour l'élimination de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Au critère d'accessibilité économique, le Mimic^{TM} 240LV et le Btk obtiennent un résultat de 3. Les études économiques révèlent une similitude dans les coûts d'achat de ces produits, soit environ 50 $/ha. Dans l'évaluation seul le prix du produit est pris en considération, car les frais afférents à l'épandage sont les mêmes pour les trois méthodes à l'étude. Bien sûr, cela s'applique davantage aux grandes superficies de forêts publiques, bien que ces solutions soient accessibles aux propriétaires privés. Pour ce qui est du Disrup Bio-Flake, une note de 2 fut attribuée, car le prix au

détail est 4 fois plus cher que les deux produits précédents, soit 200 $/ha. Encore une fois, cette note est modulée par le fait que ce sont en grande majorité des intervenants en forêts publiques qui ont les moyens financiers et matériels pour l'utilisation de cette technologie. Enfin, pour le critère de rentabilité économique, une note semblable fut attribuée au Mimic et au Disrupt, soit une valeur de 2. Afin de s'assurer de la réussite financière lors d'épandage de pesticides visant à contrôler la tordeuse des bourgeons de l'épinette, il est recommandé que la surface à traiter représente moins de 40 % du territoire attaqué afin d'être en mesure d'avoir un retour sur l'investissement. Or, il est donc primordial d'avoir un suivi de la situation en temps réel pour pouvoir bien définir le moment d'action. Ce résultat tient compte de l'incertitude face au moment opportun d'intervention. Celui-ci peut changer rapidement et donc affecter négativement les retombées économiques lors d'une action trop tardive. Le Btk est soumis aux mêmes critères de rentabilité quant à la superficie à traiter, mais son action moins létale permet de penser que les résultats obtenus par ce produit ne permettraient pas dans tous les cas d'équivaloir les montants investis dans le traitement. C'est pourquoi une valeur de 1 lui a été accordée.

7.2.3 Analyse sociale

Tableau 7.4. Résultats d'évaluation concernant la sphère du développement durable social

		Options à comparer		
Sphère du développement durable	**Critères**	**Mimic™ 240LV**	**Disrupt Bio-Flake SBW**	**Btk**
Social	1. Qualité du paysage			
	1.1 Protection du paysage à moyen terme	2	2	2
	1.2 Satisfaction du paysage	3	3	2
	2. Bien-être des populations vivant de l'activité forestière			
	2.1 La qualité de la situation financière	2	2	1
	2.2 La qualité de vie	2	2	1
	2.3 Perception sociale de la méthode ou des produits	1	1	3
Total		**10**	**10**	**9**

L'analyse selon le principe social du développement durable a été réalisée selon cinq critères distribués en deux catégories soit, la qualité du paysage et le bien-être des populations vivant de l'activité forestière. La qualité du paysage renferme un critère se rattachant à la protection du paysage à moyen terme et un autre se rapportant à la satisfaction du paysage. Quant à la section concernant le bien-être des populations, trois critères permettent de dresser un portrait de la thématique : la qualité de la situation financière, la qualité de vie et la perception sociale de la méthode ou des produits à l'étude. L'aspect social de l'analyse est défini selon que les technologies et les pratiques utilisées pour la lutte aux ravageurs forestiers créent ou non des inconvénients pour certaines activités pratiquées par la population, des impacts directs ou indirects sur la santé du vivant ou bien des impacts sur le bien-être des populations vivant principalement de l'activité forestière. Pour cette dernière étape, un total maximum de 15 points peut être obtenu. Le résultat final obtenu pour le Mimic™ 240LV est de 10 points, 10 points pour le Disrupt Bio-Flake et finalement 8 points pour le *Bacillus thuriengiensis*.

Les trois produits à l'étude ont obtenu un résultat similaire de 2 concernant le premier critère de la section qualité du paysage, soit la protection du paysage à moyen terme. Les épidémies sévères de tordeuse peuvent amener une défoliation sévère des étendues forestières et permettre ensuite une régénération dont la succession forestière est différente de celle déjà en place. De plus, comme il a été discuté dans les sections d'analyse précédentes, les substances à l'étude, lorsqu'elles sont utilisées à des moments opportuns et dans des conditions favorables, peuvent toutes trois mener à une protection du paysage à différents niveaux. Cette même réflexion justifie les résultats obtenus au critère définissant la satisfaction du paysage. En effet, un paysage forestier moins endommagé par la tordeuse garde son caractère bucolique et donc satisfait les utilisateurs de ces territoires forestiers. Le Mimic^{TM} 240LV et le Disrupt Bio-Flake SBW se voient attribuer un résultat de 3 puisque ceux-ci permettent des résultats à court terme, c'est-à-dire lors de la première saison d'application. Ainsi, le paysage n'est pas amoindri par une défoliation de plusieurs saisons successives. Ce peut être le contraire lorsqu'un traitement au Btk est appliqué. En effet, ce produit biologique est beaucoup moins agressif et plus sensible aux conditions météorologiques et environnementales comparativement aux produits synthétiques. Il est plus difficile de garantir une réussite dès la première saison de traitement. C'est pourquoi un résultat de 2 lui a été attribué, car des incertitudes persistent quant aux conséquences positives que pourrait avoir ce traitement sur le paysage.

Le critère de la qualité de la situation financière rapporte un pointage égal pour le Mimic et le Disrupt, soit une valeur de 2. Cette valeur a été accordée puisque les produits peuvent avoir un effet notable sur la conservation de la qualité du bois et par conséquent, avoir des répercussions sur la conservation des emplois lors d'épisodes épidémiques de tordeuse des bourgeons de l'épinette. Les déboires financiers des familles vivant de l'industrie forestière peuvent être amoindris si les emplois sont conservés malgré le début d'une épidémie. L'efficacité des produits à l'étude permet d'en arriver à ces conclusions. C'est aussi pourquoi le Btk reçoit une faible note de 1, puisque son efficacité est moindre et qu'il est plus difficile d'arriver à un résultat constant année après année. Les mêmes justifications ont été utilisées dans l'octroi du pointage pour une partie du critère de la qualité de vie se rapportant à l'aspect financier. Pour ce même critère, un argument de plus se glisse par rapport au Mimic^{TM} 240LV et au Disrupt Bio-Flake quant aux risques encourus pour la santé. Il a été montré dans les sections 2.4.3 et 6.1 que les risques sur la santé

humaine de ces produits synthétiques sont plutôt faibles et facilement contrôlables. Pour ces raisons, le Mimic et le Disrupt se retrouvent avec un pointage de 2, ces derniers ayant les mêmes points positifs face à la situation financière des familles plus stable lors de l'utilisation de ces moyens de lutte et aux faibles risques persistants à l'égard du danger pour la santé que ces produits peuvent représenter. Le Btk ne présente aucun risque pour la santé des populations, mais ses faibles résultats sur la diminution du nombre de larves présentes en forêt ne permettent pas d'assurer de façon stable une qualité de vie satisfaisante aux travailleurs. Pour ces raisons, un pointage de 1 lui a été attribué.

Enfin, le dernier critère exposant la perception sociale de la méthode ou bien des produits utilisés contre les ravageurs forestiers laisse un pointage plus faible pour deux des substances à l'étude. En effet, le Mimic et le Disrupt se retrouvent au plancher avec une note de 1. La perception sociale des insecticides chimiques a fortement guidé l'attribution de ce pointage. Les nouvelles technologies de ce type soulèvent beaucoup d'inquiétude chez les gens. Les gens sont peu enclins à l'utilisation d'insecticide puisque l'information valable et la désinformation sont parfois difficiles à percevoir pour les personnes moins initiées. Ils se sentent interpellés par ce qui est répandu dans leur environnement et veulent bien connaître les enjeux sous-jacents. C'est un peu le contraire dans le cas du Btk qui obtient un résultat de 3. Ce pesticide biologique est utilisé depuis longtemps et a eu la chance de vivre toutes les études requises pour prouver à la population ses impacts minimes sur leur environnement. De plus, l'appellation biologique joue probablement un rôle dans l'acceptabilité sociale de ce produit, contrairement aux deux autres qui sont de nature synthétique.

7.3 Conclusion de l'analyse multicritère

Le tableau 7.5 offre une image complète regroupant toutes les sphères de l'environnement à l'étude. Il permet d'avoir un aperçu complet des résultats pour les trois produits antiparasitaires étudiés. Les pointages finaux ainsi que les moyennes pondérées y sont présentés.

Tableau 7.5. Pointage et moyennes pondérées obtenues pour chaque critère d'analyse selon les trois sphères du développement durable (environnement, économie, social) (Mimic™ 240LV, Disrupt Bio-Flake, *Bacillus thuringiensis*)

		Mimic™ 240LV		Disrupt Bio-Flake SBW		*Bacillus thuringiensis*	
Sphère du développement durable	**Critères**	**Pointage**	**Moyenne pondérée**	**Pointage**	**Moyenne pondérée**	**Pointage**	**Moyenne pondérée**
Environnement 33,3 %	1. Milieu aquatique		20,37		22,22		27,77
	1.1 Impacts sur les invertébrés	1		2		2	
	1.2 Impacts sur les vertébrés	2		2		2	
	1.3 Impacts sur les végétaux	2		1		3	
	2. Milieu terrestre						
	2.1 Impacts sur les invertébrés	2		3		2	
	2.2 Impacts sur les vertébrés	2		1		3	
	2.3 Impacts sur les végétaux	2		3		3	
Économie 33,3 %	1. Santé de l'arbre		25,39		23,80		22,22
	1.1 Amélioration de la santé de l'arbre à court terme	2		2		2	
	1.2 Amélioration de la santé de l'arbre à long terme	3		3		2	
	2. Mode d'action						

Tableau 7.5. Pointage et moyennes pondérées obtenues pour chaque critère d'analyse selon les trois sphères du développement durable (environnement, économie, social) (Mimic™ 240LV, Disrupt Bio-Flake, *Bacillus thuringiensis*) (suite)

		Mimic™ 240LV		Disrupt Bio-Flake SBW		*Bacillus thuringiensis*	
Sphère du développement durable	**Critères**	**Pointage**	**Moyenne pondérée**	**Pointage**	**Moyenne pondérée**	**Pointage**	**Moyenne pondérée**
Économie 33,3 %	2.1 Action de prévention	2	25,39	2	23,80	2	22,22
	2.2 Action d'intervention	3		3		1	
	3. Rentabilité et accès						
	3.1 Facilité d'accès à la méthode d'intervention	1		1		3	
	3.2 Accessibilité économique de la méthode	3		2		3	
	3.3 Rentabilité de la méthode	2		2		1	
Social 33,3 %	1. Qualité du paysage		22,22		22,22		20
	1.1 Protection du paysage à moyen terme	2		2		2	
	1.2 Satisfaction du paysage	3		3		2	
	2. Bien-être des populations vivant de l'activité forestière						
	2.1 La qualité de la situation financière	2		2		1	
	2.2 La qualité de vie	2		2		1	
	2.3 Perception sociale de la méthode ou des produits	1		1		3	
Total		38	67,98 %	35	67,44 %	38	69,99 %

À la suite de l'analyse multicritère, il est possible d'affirmer que les résultats montrent une certaine similitude entre les différentes options antiparasitaires comparées, soit le Mimic^{TM} 240LV, le Disrupt Bio-Flake SBW et le *Bacillus thuringiensis*. Le résultat le plus élevé, 69,99 points sur un total possible de 100, a été obtenu par le Btk. Celui-ci est suivi de près par le Mimic avec un résultat de 67,98 points et finalement, le Disrupt termine la course avec un total de 67,44 points. À ces résultats, il est difficile de déterminer qu'une méthode est plus respectueuse des principes du développement durable qu'une autre, les nuances sont plus visibles en isolant chacune des sphères.

Au niveau environnemental, c'est le Btk qui obtient le plus de points, soit 27,77. Cette technologie a remporté le décompte des points parce qu'elle représente très peu de risque sur l'ensemble du vivant pouvant être retrouvé dans un écosystème donné. Le Disrupt Bio-Flake SBW, qui a tout de même obtenu un résultat de 22,22 points, a des inconvénients pouvant apporter des conséquences notables sur le vivant, ce qui le place derrière le Btk. Le plus faible résultat, soit de 20,37 pour le Mimic^{TM} 240LV, résulte des risques importants auxquels toutes les composantes de l'écosystème peuvent être exposées. Cependant, le pointage est modéré par le fait que les risques encourus peuvent être bien contrôlés. Ce sont la gravité des conséquences observées lors d'expérimentations en laboratoire qui module ce résultat à la baisse.

Le Mimic est le produit ayant le mieux performé pour la dimension économique. Avec un résultat de 25,39 points, sa rapidité d'action et son accessibilité économique lui ont permis de gagner un bon nombre de points. Le Disrupt Bio-Flake SBW obtient un total de 23,80 points. Sa plus faible accessibilité économique reste le point majeur ayant porté son résultat à la baisse en comparaison avec le Mimic. Enfin, le Btk termine la course avec un pointage de 22,22 points. La faible rentabilité de la méthode et son efficacité moindre explique en grande partie sa troisième place pour la sphère économique.

Enfin, pour la sphère sociale, les résultats sont très similaires entre les trois options. Le Mimic^{TM} 240LV et le Disrupt Bio-Flake terminent avec un pointage de 22,22 en ayant obtenu les mêmes performances pour chacun des critères. La force de ces produits réside dans les impacts positifs qu'ils peuvent apporter à la qualité de la situation financière et à la qualité de vie des familles vivant de l'industrie forestière. Pour sa part, le Btk obtient un résultat de 20 points. En

comparaison aux deux autres options antiparasitaires, celle-ci montre une plus lente action insectifuge. Dû à cette propriété de la substance, il est impossible d'obtenir un fort pointage pour les autres critères d'évaluation.

8 RECOMMANDATIONS

À la lumière de ces résultats, plusieurs options peuvent être entrevues pour le futur. À partir de cette analyse, des recommandations ont été développées afin de mettre au premier plan des actions permettant de tirer avantage de chacune des options de lutte antiparasitaires étudiées.

8.1 Favoriser l'utilisation et la combinaison des produits synthétiques antiparasitaires étudiés tels que le Mimic ^{TM} 240LV et le Disrupt Bio-Flake SBW.

La situation de ces deux produits antiparasitaire est différente au Canada en ce moment. Le Mimic est un pesticide enregistré au pays depuis 2010 et se retrouve dans la catégorie C du classement des pesticides (Santé Canada, 2013). Selon l'ARLA, la demande de cette catégorie ne requiert aucune donnée et a des exigences réduites pour de nouvelles inscriptions ou modifications de produits. En ce moment, aucun permis n'est nécessaire pour des épandages sur des surfaces plus petites que 800 hectares. Selon ces conditions, le Mimic reste accessible pour une utilisation sous forme de test, mais une utilisation comme moyen de lutte reste aussi possible dans ces conditions (Régnière, 2013c). Selon le Code de gestion des pesticides au Québec, le Mimic ne peut être utilisé en ce moment puisque le seul insecticide permis pour l'arrosage des forêts publiques est le *Bacillus thuringiensis* (SOPFIM, 2011). L'efficacité probante de ce produit et ses faibles risques mériteraient une révision de la réglementation du *Code de gestion des pesticides*, en ce qui a trait à la portion forestière de celui-ci. De cette façon, de plus grandes superficies, souvent aux prises avec des épidémies sévères de tordeuse, pourraient être protégées, malgré l'état avancé des épidémies en cours.

Dans le cas du Disrupt Bio-Flake, ce produit n'a jamais été utilisé comme moyen de lutte antiparasitaire. Ce concept visant à réduire la fertilité des papillons de tordeuse des bourgeons de l'épinette est encore à l'étude. Les plus récentes études montrent une avenue d'avenir quant à son utilisation. De plus, la combinaison du Disrupt avec le Mimic permet d'attaquer le problème sous tous les angles. Le Disrupt agit sur la proportion d'adultes qui réussiront à trouver un partenaire pour l'accouplement, donc sur la réduction des générations futures, et le Mimic agit sur l'élimination des chenilles causant du ravage sur le feuillage des conifères. De cette façon, le contrôle de la population de tordeuses à un niveau endémique reste plus qu'encourageant.

8.2 Organiser des séances d'informations dans les régions où un arrosage de Mimic^{TM} 240LV ou de Disrupt Bio-Flake est planifié.

Étant donné que ces produits antiparasitaires synthétiques entretiennent un sentiment de méfiance de la part de la population, il serait judicieux d'organiser des séances d'information pour la population présente dans le secteur où l'on prévoit l'épandage de ces produits. Ceci permettrait de prévenir la désinformation pouvant circuler à ce sujet, en plus de permettre un échange entre les experts et les gens désirant exposer leurs interrogations. Créer un lien de confiance avec la population semble inévitable dans ce genre de situation afin de mener à bien une action antiparasitaire de grande envergure.

8.3 Réaliser les tests en laboratoire afin de compléter la littérature sur les nouveaux produits antiparasitaires mentionnés.

Comme l'analyse multicritère a pu le démontrer, certains aspects techniques des produits présentés sont pour l'instant encore inconnus. C'est pourquoi des études se poursuivent pour bien cerner tous les risques et adapter les techniques de formulation ou d'épandage. Il est certain que ces études nécessitent l'expérimentation sur le terrain afin de voir la réelle réaction du produit dans l'environnement. C'est pourquoi les recherches en cours sont donc très importantes et aideront à la mise en place de ces nouveaux produits comme moyens de lutte approuvés et contrôlés.

CONCLUSION

Le seul traitement insecticide contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette autorisé sur les forêts publiques de la province de Québec, le *Bacillus thuringiensis*, est remis en question par les scientifiques qui tentent de trouver des options efficaces et sans danger pour l'écosystème forestier dans son ensemble. Le présent essai avait pour objectif principal d'évaluer, dans une optique de développement durable trois options de lutte antiparasitaire contre la tordeuse, soit le Mimic^{TM} 240LV, le Disrupt Bio-Flake et le *Bacillus thuringiensis* afin d'en venir à l'élaboration de recommandations. Le tout a pu être réalisé en atteignant les objectifs spécifiques du projet, soit la description des produits à l'étude et l'analyse des conséquences de ceux-ci sur les sphères du développement durable (l'environnement, l'économie et le social).

À la suite de l'analyse multicritère, il est possible d'affirmer que les résultats démontrent une certaine similitude entre les différentes options antiparasitaires comparées, soit le Mimic^{TM} 240LV, le Disrupt Bio-Flake SBW et le *Bacillus thuringiensis*. Le résultat le plus élevé, 69,99 points sur un total possible de 100, a été obtenu par le Btk. Celui-ci est suivi de près par le Mimic avec un résultat de 67,98 points et finalement, le Disrupt termine la course avec un total de 67,44 points. À ces résultats, il est difficile de déterminer qu'une méthode est plus respectueuse des principes du développement durable qu'une autre, les nuances sont plus visibles en isolant chacune des sphères.

Dans la lutte à la tordeuse, la stratégie s'étant le plus illustrée au plan environnemental est le *Bacillus thuringiensis* (27,77 points). Sa présence endémique en milieu naturel place cet insecticide en bonne position quant aux faibles impacts sur les invertébrés, les vertébrés et les végétaux. Le Disrupt Bio-Flake obtient une performance notable de 22,22 points, mais des conséquences possibles sur l'écosystème n'ont pu lui donner un maximum de points. Quant au Mimic^{TM} 240LV, son pointage de 20,37 points s'explique par les conséquences graves pouvant être identifiées à la suite de son utilisation. Cependant, ce pointage est modulé par le fait que ces risques peuvent être bien contrôlés et donc, moins probables.

Le Mimic^{TM} 240LV obtient le pointage le plus élevé (25,39 points) en ce qui concerne la sphère économique. Les points forts lui ayant permis de se démarquer dans cette dimension sont, entre autres, la possibilité de le voir comme une action d'intervention l'accessibilité économique. Le

Disrupt Bio-Flake obtient quant à lui un pointage de 23,80 points. Le tournant ayant porté son résultat à la baisse a été sa faible accessibilité économique. Enfin, le Btk termine avec un pointage de 22,22 points. Sa faible rentabilité et son efficacité moindre expliquent majoritairement ce résultat.

L'égalité des pointages entre le Mimic^{TM} 240LV et le Disrupt Bio-Flake pour la dimension sociale de l'analyse ne permet pas d'établir qu'un produit est assurément plus avantagé à l'intérieur de cet aspect du développement durable. Les aspects marquants de ces produits résident dans les impacts positifs pouvant être remarqués à la suite de leur utilisation. En effet, ils sont en mesure d'améliorer la qualité de la situation financière et la qualité de vie des familles dont les revenus proviennent en majorité de l'industrie forestière. Dans le cas du *Bacillus thuringiensis*, un résultat de 20 points a été obtenu. Ce produit demeure beaucoup moins agressif dans son action que les deux autres et démontre une action insectifuge plus lente. À ce moment, il est difficile de marquer davantage de points pour les autres critères contenus dans cette section de l'analyse.

À partir de ces résultats, trois recommandations ont été élaborées. La première réside dans l'accessibilité dans la réglementation à l'utilisation du Mimic et du Disrupt. La loi québécoise ne permet pour le moment qu'un seul produit antiparasitaire dans la lutte à la tordeuse des bourgeons de l'épinette, soit le Btk. Il est alors suggéré d'y apporter des modifications pour permettre aux produits à l'étude d'être utilisés comme moyens plus officiels de lutte. De plus, la combinaison du Mimic et du Disrupt permettrait d'attaquer les problématiques épidémiques sous tous les fronts. Ensuite, il a été recommandé de concevoir des séances d'informations pour les populations résidant près des zones soumises à de futurs épandages de Mimic et de Disrupt. Le but visé de cette action est de créer un lien de confiance avec les gens pour mener à bien une opération antiparasitaire d'envergure et aussi de minimiser la distribution de désinformation à ce sujet. Finalement, il est encouragé à exécuter, continuer et renouveler certains tests en cours sur tous les aspects concernant l'action ou les conséquences des produits synthétiques traités dans cet essai.

Somme toute, les situations naturelles hors du contrôle humain peuvent représenter un frein à l'expansion d'activités économiques. La foresterie étant très sensible à ces facteurs est définitivement affectée par les ravageurs forestiers. Une nouvelle perception dans la lutte à ces

insectes proposant de brouiller leurs systèmes naturels de croissance et de signaux olfactifs semble être une voie d'avenir. Les technologies présentées tout au long de cet essai permettraient au système forestier de réagir presque en temps réel à de telles situations. Une ouverture quant à l'utilisation d'insecticide ayant de faibles impacts sur les écosystèmes et sur les populations reste tout de même à développer. Il se peut que ce point soit le combat de la prochaine génération.

RÉFÉRENCES

AAC (2000). *Une analyse des incidences environnementales de l'insecticide microbien Bacillus thuringiensis* (Bulletin technique). Saint-Jean-sur-Richelieu.

Bauce, E., Carisey, N., Dupont, A. et Van Frankenhuyzen, K. (2004). *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* Aerial Spray Prescriptions for Balsam Fir Stand Protection Against Spruce Budworm (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology,* vol. 97 (5), n° 1624-1634.

Béchard, A. (2013). L'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette au Bas-Saint-Laurent. Communication orale. *Rencontre,* 20/06/2013, Mont-Comi.

Bellavance, M. et Nadeau, S. (s.d.). La biodiversité au Bas-Saint-Laurent: La contribution des propriétaires de boisés privés. *Agence régionale de mise en valeur des forêts privées du Bas-Saint-Laurent.*

Campbell, N.A. et Reece, J.B. (2004). *Biologie.* Saint-Laurent, Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., 1400 p.

CRAAQ (2013). Effets toxiques des matières actives. *In* Le centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. *SAGE Pesticides.* http://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/resultats.aspx?Search=matiere&ID=172 (Page consultée le 07/04 2013).

Dallaire, R. (2003). *Effets sous-létaux du tébufénozide, un régulateur de croissance d'insectes, sur la comunication chimique et le succès reproducteur chez Chroristoneura fumiferana et C. rosaceana (Lepidoptera: Tortricidae).* Maîtrise, Université Laval, Québec.

Dictionnaire de français Larousse (s.d.a). Dictionnaire de français Larousse. *In* Anonyme. *Dictionnaire de français Larousse.* http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/chrysalide/15871 (Page consultée le 12/29 2013).

Dictionnaire de français Larousse (s.d.b). Dictionnaire de français Larousse. *In* Anonyme. *Dictionnaire de français Larousse.* http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/agoniste/1714 (Page consultée le 12/29 2013).

Dictionnaire de français Larousse (s.d.c). Dictionnaire de français Larousse. *In* Anonyme. *Dictionnaire de français Larousse.* http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/hydrolyse/40838 (Page consultée le 12/29 2013).

Dictionnaire de français Larousse (s.d.d). Dictionnaire de français Larousse. *In* Anonyme. *Dictionnaire de français Larousse.*

http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/ph%C3%A9romone/60232 (Page consultée le 12/29 2013).

Dictionnaire de français Larousse (s.d.e). Dictionnaire de français Larousse. *In* Anonyme. *Dictionnaire de français Larousse.* http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/univoltin_univoltine/80631 (Page consultée le 12/29 2013).

DictionnairEnvironnement (2010a). Aérobie la définition du dico. *In* Recyconsult. *DictionnairEnvironnement.* http://www.dictionnaire-environnement.com/aerobie_ID242.html (Page consultée le 12/29 2013).

DictionnairEnvironnement (2010b). Bioaccumulation la définition du dico. *In* Recyconsult. *DictionnairEnvironnement.* http://www.dictionnaire-environnement.com/bioaccumulation_ID478.html (Page consultée le 12/29 2013).

DictionnairEnvironnement (2010c). Demi-vie la définition du dico. *In* Recyconsult. *DictionnairEnvironnement.* http://www.dictionnaire-environnement.com/demi-vie_ID3575.html (Page consultée le 12/29 2013).

DictionnairEnvironnement (2010d). Dose létale (DL50) la définition du dico. *In* Recyconsult. *DictionnairEnvironnement.* http://www.dictionnaire-environnement.com/dose_letale_50_dl50_ID1953.html (Page consultée le 12/29 2013).

DictionnairEnvironnement (2010e). Facteur abiotique la définition du dico. *In* Recyconsult. *DictionnairEnvironnement.* http://www.dictionnaire-environnement.com/facteur_abiotique_ID4810.html (Page consultée le 12/29 2013).

DictionnairEnvironnement (2010f). Lessivage la définition du dico. *In* Recyconsult. *DictionnairEnvironnement.* http://www.dictionnaire-environnement.com/lessivage_ID1129.html (Page consultée le 12/29 2013).

DictionnairEnvironnement (2010g). Persistance la définition du dico. *In* Recyconsult. *DictionnairEnvironnement.* http://www.dictionnaire-environnement.com/persistance_ID1800.html (Page consultée le 12/29 2013).

DictionnairEnvironnement (2010h). Photolyse la définition du dico. *In* Recyconsult. *DictionnairEnvironnement.* http://www.dictionnaire-environnement.com/photolyse_ID4684.html (Page consultée le 12/29 2013).

DictionnairEnvironnement (2010i). Phytotoxicité la définition du dico. *In* Recyconsult. *DictionnairEnvironnement.* http://www.dictionnaire-environnement.com/phytotoxicite_ID3059.html (Page consultée le 12/29 2013).

Dictionnaire Santé (2011). Définition bêta-oxydation. *In* Anonyme. *Dictionnaire Santé.* http://www.dictionnaire-sante.com/definition-beta-oxydation (Page consultée le 12/29 2013).

Doctissimo (2008). Dictionnaire médical. In Doctissimo. Doctissimo. http://dictionnaire.doctissimo.fr/definition-methemoglobinemie-congenitale.htm (Page consultée le 12/26 2013).

Doctissimo (s.d.). Analyses médicales. In Doctissimo. Doctissimo. http://www.doctissimo.fr/html/sante/analyses/ana_proteines13.htm (Page consultée le 12/26 2013).

Dow AgroSciences. (2008). *Mimic* 240LV, insecticide forestier.* Document non-publié.

Dow AgroSciences. (s.d.a). *Fiche signalétique, mimic* 240 lV insecticide forestier.* Document non-publié.

Dow AgroSciences. (s.d.b). *Mimic 240 LV controls lepidotera larva accurately and efficiently.* Document non-publié.

Dow AgroSciences. (s.d.c.). *Mimic* 240LV.* Document non-publié.

Dugal, J. (1986). *Évaluation des effets de l'insecticide biologique Bacillus thuringiensis Berilner sur la faune vertébrée du Québec* (Rapport technique). Québec.

Durkin, P. R. et Klotzbach, J. (2004). *Control/Eradication Agents for the Gypsy Moth - Human health and ecological risk assessment for tebufenozide (Mimic)* (Rapport final). New York.

Fournier, C. (2009). *Impacts de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Choristoneuro fumiferana (Clem.)) sur les volumes ligneux des sapinières protégées par l'application aérienne de Bacillus thuringiensis var. Kurstaki.* Maîtrise, Université Laval, Québec.

H. Resh, V. et T. Cardé, R. (2009). *Encyclopedia of insects.* 2 ed. édition, Burlington, USA, Elsevier, 1073 p.

Hercon Environnemental (2011). Forestry. *In* Hercon Environnemental. *Hercon Environnemental.* http://www.herconenviron.com/forestry.php# (Page consultée le 05/15 2013).

Hercon Environnemental. (s.d.). *Material safety data sheet.* Document non-publié.

HERCON. (s.d.). *Disruot bio-flake SBW*
spruce budworm mating disruptant
for use as a mating disruptant for the spruce budworm. Document non-publié.

IRSEA (s.d.). Quelques définitions. In IRSEA. Institut de recherche en Sémiochimie et Ethologie Appliquée. http://www.group-irsea.com/ (Page consultée le 12/26 2013).

Jardon, Y., Morin, H. et Dutilleul, P. (2003). Périodicité et synchronisme des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec. *Canadian Journal of Forest Research,* vol. 33, n° 1947-1961.

Lafrance, M.A. (2006). *Le potentiel de la certification à favoriser la mise en oeuvre d'une foresterie durable.* Maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal.

Maini, J.S. (s.d.). Développement durable des forêts. *Archives de documents de la FAO, .* http://www.fao.org/docrep/u6010f/u6010f03.htm (Page consultée le 15/05/2013).

MDDEFP (2012). Code de gestion des pesticides. *In* Ministère du Développement durable, Environnement, Faune et Parcs. *Ministère du Développement durable, Environnement, Faune et Parcs.* http://www.mddep.gouv.qc.ca/pesticides/permis/code-gestion/aires-forest/ (Page consultée le 08/18 2013).

Mockler, P. et Fairbairn, J. (2009). *Le secteur forestier Canadien: passé, présent, futur* (Rapport parlementaire). Ottawa.

MRN (2010). Les forêts du Québec immenses et fascinantes. *In* Gouvernement du Québec. *Ministère des Ressources naturelles du Québec.* http://www.mrn.gouv.qc.ca/international/forets.jsp (Page consultée le 05/15 2013).

MRN (2011). *Aires infestées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec en 2011* (Publication gouvernementale). 1.0 édition, Québec, 22 p.

MRN (2013a). Gros plan sur le Bas-Saint-Laurent. *In* Gouvernement du Québec. *Ministère des Ressources naturelles du Québec.* http://www.mrn.gouv.qc.ca/bas-saint-laurent/region/index.jsp (Page consultée le 05/15 2013).

MRN (2013b). La tordeuse des bourgeons de l'épinette. *In* Ministère des Ressources naturelles du Québec. *Gros plan sur les forêts.* http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-insectes-tordeuse.jsp (Page consultée le 08/16 2013).

MRN (2013c). Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. *In* Gouvernement du Québec. *Ministère des Ressources naturelles du Québec.* http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jsp (Page consultée le 11/24 2013).

Nlombi, K. et Koran, Z. (1989). Les caractéristiques papetières du bois attaqués par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. *Canadian Journal of Forest Research,* vol. 19, n° 986-991.

OFDT (2004). Guide des outils d'évaluation de projets selon le développement durable. . www.are.admin.ch/dokumentation/publikationen/.../index.html? (Page consultée le 06/07/2013).

Pureswaran, D., De Grandpré, L., Kneeshaw, D. et Régnière, J. (2013). *Gérer la tordeuse des bourgeons de l'épinette selon les changements climatiques.* Document non-publié.

Régnière, J. (2013a). L'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette en cours au Bas-Saint-Laurent. Communication orale. *Rencontre,* 23/05/2013, Mont-Comi.

Régnière, J. (2013b). Impacts environnementaux, économiques et sociaux du Mimic^{TM} 240LV et du Disrupt Bio-Flake SBW. Communication orale. *Rencontre,* 18/07/2013, Mont-Comi.

Régnière, J. (2013c). L'efficacité et les contraintes du MimicTM 240LV, du Disrupt Bio-Flake SBW et du Bacillus thuringiensis. Communication orale. *Rencontre,*18/11/2013, Québec.

RNCAN (2011). Carie rouge du pied de l'aubier. *In* Ressources Naturelles Canada. *Ressources naturelles Canada.* http://aimfc.rncan.gc.ca/maladies/fiche/1000024 (Page consultée le 08/17 2013).

RNCAN. (s.d.). *La tordeuse des bourgeons de l'épinette.* Document non-publié.

Reverso (s.d.a). Dictionnaire. *In* Synapse. *Reverso.* http://dictionnaire.reverso.net/francais-definition/entomopathog%C3%A8ne (Page consultée le 12/29 2013).

Reverso (s.d.b). Dictionnaire. *In* Synapse. *Reverso.* http://dictionnaire.reverso.net/francais-definition/complexation (Page consultée le 12/29 2013).

Reverso (s.d.c). Dictionnaire. *In* Synapse. *Reverso.* http://dictionnaire.reverso.net/anglais-definition/hibernaculum (Page consultée le 12/29 2013).

Reverso (s.d.d). Dictionnaire. *In* Synapse. *Reverso.* http://dictionnaire.reverso.net/francais-definition/m%C3%A9lanisation) Persistance Caractéristique d'une substance à demeurer présente (Page consultée le 12/29 2013).

Santé Canada (2007). *(E,Z)-11-tetradecenal* (Rapport d'évaluation).

Santé Canada (2009). Sécurité des produits de consommation: *Bacillis thuringiensis* ssp. *kurstaki*. *In* Anonyme. http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pubs/pest/_fact-fiche/btk/index-fra.php (Page consultée le 07/16 2013).

Santé Canada (2013). Historical amendment applications. *In* Santé Canada. *Consumer Product Safety.* http://pr-rp.hc-sc.gc.ca/pi-ip/result-eng.php?1=3000&2=3501&3=amh&4=y&5=2&6=DESC&7=X&8=E (Page consultée le 12/24 2013).

SOPFIM (1992). *Programme quinquennal (1993-1997) de pulvérisations aériennes d'insecticides contre certains insectes forestiers. Tome 1 - Tordeuse des bourgeons de l'épinette* (Étude d'impact). Québec.

SOPFIM (2011). Produits utilisés. *In* http://sopfim.qc.ca/produits-utilises.html. *Société de protection des forêts contre les insectes et les maladies.* http://sopfim.qc.ca/produits-utilises.html (Page consultée le 06/26 2013).

SOPFIM (2012). *Programme de pulvérisation aérienne d'insecticide biologique (Btk) contre la tordeuse de bourgeons de l'épinette* (Plan d'intervention). Québec.

Trudel, R., Dupont, A. et Bélanger, A. (2011). *Experimental pheromone applications using Disrupt Micro-Flake SBW© for the control of the spruce budworm populations: Quebec mating disruprion trials 2008* (Rapport d'évaluation).

WRI (2000). *Les forêts du Canada à la croisée des chemins: Bilan 2000* (Rapport technique). Canada, World Resources Institute